

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**  
**Escuela Politécnica Superior**  
Departamento de Ingeniería Eléctrica



**TRABAJO FIN DE GRADO**

Grado en Ingeniería Eléctrica

**“Módulo de procesamiento de patrones resueltos en fase. Sistema de identificación automática de fuentes de descargas parciales”**

**Autor:** Álvaro Perea Perelló

**Tutor:** Jorge Alfredo Ardila Rey

**Cotutor:** Juan Manuel Martínez Tarifa

Leganés, Octubre 2014



# **TRABAJO FIN DE GRADO**

## **Módulo de procesamiento de patrones resueltos en fase. Sistema de identificación automática de fuentes de descargas parciales**

Autor: Álvaro Perea Perelló

Tutor: Jorge Alfredo Ardila Rey

Cotutor: Juan Manuel Martínez Tarifa

Firma del tribunal calificador

Firma

Presidente:

Vocal:

Secretario:

Calificación:

**Leganés, 9 de Octubre de 2014**



# Contenido

---

<b>Contenido</b>	<b>V</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>VIII</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>XII</b>
<b>1.INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2.ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>3</b>
2.1.Definición de descarga parcial .....	3
2.2.Mecanismos de ionización de los gases .....	3
2.2.1.Mecanismo “serpentina” Streamer .....	4
2.2.2.Evolución de la corriente en un gas .....	5
2.2.3.Curvas Paschen .....	6
2.3.Modelado de descargas parciales .....	7
2.3.1.Distribución del campo eléctrico .....	7
2.3.2.Circuito equivalente de modelado de actividad de descargas parciales .....	8
2.3.3.Unidades de medida de descargas parciales .....	10
2.4.Detección de descargas parciales .....	10
2.4.1.Métodos no eléctricos .....	10
2.4.2.Método RF .....	12
2.4.3.Método eléctrico .....	12
2.4.3.1.Circuitos de medida.....	13
2.5.Tipos de descargas parciales.....	14
2.5.1.Descargas parciales internas .....	14
2.5.2.Descargas parciales superficiales.....	16
2.5.3.Descargas parciales corona .....	16
2.6.Análisis estadístico para la identificación de fuentes de descargas parciales.....	17
2.6.1.Parámetros estadísticos en amplitud .....	18
2.6.1.1.Cálculo de los parámetros de Weibull .....	18

2.6.2. Parámetros estadísticos de fase.....	19
2.6.3. Identificación automática de descargas parciales.....	23
2.6.3.1. Identificación basada en lógica <i>fuzzy</i> (lógica difusa).....	26
<b>3. ENSAYOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE PATRONES DE DIVERSAS FUENTES.....</b>	<b>27</b>
3.1. Ensayos realizados.....	27
3.2. Comparación entre sistemas de adquisición.....	37
3.3. Comparación entre diferentes fuentes de emisión de pulsos.....	38
3.3.1. Propuesta valores umbrales.....	39
3.3.2. Primera propuesta de algoritmo de clasificación de patrones resueltos en fase.....	40
3.3.3. Segunda propuesta de algoritmo de clasificación de patrones resueltos en fase.....	43
<b>4. DESARROLLO DEL SOFTWARE OFF-LINE DE IDENTIFICACIÓN DE DESCARGAS PARCIALES.....</b>	<b>48</b>
4.1. Sistema de detección y adquisición.....	48
4.2. <i>Software</i> del sistema.....	49
4.3. Diseño del programa.....	50
4.3.1. Selección de archivos.....	51
4.3.2. Escalado y forma de onda sinusoidal.....	52
4.3.3. Filtrado por fase y <i>trigger</i> .....	52
4.3.4. Identificación automática.....	53
4.4. Panel de usuario.....	53
4.4.1. Primera pestaña.....	53
4.4.2. Segunda pestaña.....	54
4.4.3. Tercera pestaña.....	55
4.4.4. Funcionamiento.....	55
<b>5. APLICACIÓN DEL SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE PATRONES.....</b>	<b>60</b>
5.1. Resultados del funcionamiento de los sistemas de identificación.....	60
5.1.1. Carpeta Corona.....	61
5.1.2. Carpeta Superficiales.....	65

5.1.3.Carpeta Internas .....	70
5.2.Análisis del sistema de identificación .....	76
5.2.1.Conclusiones del sistema de identificación .....	76
5.2.2.Ampliación base de datos para caracterización de descargas corona.....	77
<b>6.CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....</b>	<b>83</b>
6.1.Conclusiones.....	83
6.2.Trabajos futuros.....	84
<b>7.PLANIFICACIÓN .....</b>	<b>86</b>
7.1.Tareas.....	86
7.2.Planificación tareas.....	87
<b>8.PRESUPUESTO .....</b>	<b>89</b>
8.1.Costes directos.....	89
8.1.1.Costes de personal e instalaciones .....	89
8.1.2.Costes elementos <i>software</i> y <i>hardware</i> .....	90
8.2.Presupuesto final .....	91
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>92</b>

# Lista de figuras

---

➤ <b>Figura 2.1.</b> Mecanismo Streamer .....	4
➤ <b>Figura 2.2.</b> Corriente en un gas frente a la tensión aplicada.....	5
➤ <b>Figura 2.3.</b> Curvas Paschen para varios gases .....	6
➤ <b>Figura 2.4.</b> Capas plano-paralelas de dieléctrico perpendiculares al campo eléctrico AC .....	7
➤ <b>Figura 2.5.</b> Reparto de campos eléctricos en AC.....	8
➤ <b>Figura 2.6.</b> Modelo eléctrico de aislante con vacuola .....	9
➤ <b>Figura 2.7.</b> Descargas parciales en una cavidad sometida a corriente alterna.....	10
➤ <b>Figura 2.8.</b> Esquema circuito de detección directo (arriba) e indirecto (abajo) .....	13
➤ <b>Figura 2.9.</b> Ejemplos de varios tipos de descargas parciales internas .....	14
➤ <b>Figura 2.10.</b> Descargas parciales producidas en la cavidad de un dieléctrico.....	15
➤ <b>Figura 2.11.</b> Patrón típico de descargas parciales internas .....	15
➤ <b>Figura 2.12.</b> Descarga parcial superficial .....	16
➤ <b>Figura 2.13.</b> Patrón típico de descargas parciales superficiales.....	16
➤ <b>Figura 2.14.</b> Descarga parcial corona .....	17
➤ <b>Figura 2.15.</b> Patrón típico de descargas parciales corona.....	17
➤ <b>Figura 2.16.</b> Ejemplo <i>Skewness</i> .....	21
➤ <b>Figura 2.17.</b> Ejemplo <i>Kurtosis</i> .....	21
➤ <b>Figura 2.18.</b> Ejemplo factor de correlación cruzado.....	22
➤ <b>Figura 2.19.</b> Ejemplo de “huella dactilar” .....	23
➤ <b>Figura 2.20.</b> Comportamiento de una cavidad embebida en aislamiento en función de <i>overvoltage ratio</i> (tensión aplicada/tensión inception) .....	24
➤ <b>Figura 2.21.</b> Comparación de los resultados obtenidos de los parámetros $\beta$ , $\varphi_i$ , $\varphi_m$ y la <i>Skewness</i> de la distribución de amplitud.....	25
➤ <b>Figura 3.1.</b> Montaje de laboratorio .....	27
➤ <b>Figura 3.2.</b> Objeto de ensayo punta-plano .....	28
➤ <b>Figura 3.3.</b> PRPD punta-plano LINEALT_PROCESSING (izquierda) y PD_PROCESSING (derecha).....	28
➤ <b>Figura 3.4.</b> Objeto de ensayo tridente .....	29
➤ <b>Figura 3.5.</b> PRPD tridente LINEALT_PROCESSING (izquierda) y PD_PROCESSING (derecha).....	29
➤ <b>Figura 3.6.</b> Colocación papel perforado .....	30
➤ <b>Figura 3.7.</b> Objeto de ensayo Internas 1 .....	30

➤ <b>Figura 3.8.</b> PRPD Internas 1 LINEALT_PROCESSING (izquierda) y PD_PROCESSING (derecha).....	30
➤ <b>Figura 3.9.</b> Colocación metacrilato perforado .....	31
➤ <b>Figura 3.10.</b> Objeto de ensayo de Internas 2 .....	32
➤ <b>Figura 3.11.</b> PRPD Internas 2 LINEALT_PROCESSING (izquierda) y PD_PROCESSING (derecha).....	32
➤ <b>Figura 3.12.</b> PRPD Internas 3 LINEALT_PROCESSING (izquierda) y PD_PROCESSING (derecha).....	33
➤ <b>Figura 3.13.</b> Objeto de ensayo par trenzado .....	34
➤ <b>Figura 3.14.</b> PRPD par trenzado LINEALT_PROCESSING (izquierda) y PD_PROCESSING (derecha).....	34
➤ <b>Figura 3.15.</b> Objeto de ensayo lámina .....	35
➤ <b>Figura 3.16.</b> PRPD lámina LINEALT_PROCESSING (izquierda) y PD_PROCESSING (derecha).....	35
➤ <b>Figura 3.17.</b> PRPD Ruido LINEALT_PROCESSING (izquierda) y PD_PROCESSING (derecha).....	36
➤ <b>Figura 3.18.</b> Ejemplo <i>skewness</i> de la distribución de amplitud.....	38
➤ <b>Figura 3.19.</b> Gráficas resultados obtenidos.....	39
➤ <b>Figura 3.20.</b> Árbol de decisión I.....	41
➤ <b>Figura 3.21.</b> Cálculo probabilidad de internas y superficiales ( $\varphi_m$ ).....	41
➤ <b>Figura 3.22.</b> Cálculo probabilidad de internas y superficiales ( $\varphi_i$ ).....	42
➤ <b>Figura 3.23.</b> Árbol de decisión II.....	46
➤ <b>Figura 3.24.</b> Cálculo probabilidad de internas y superficiales ( $\varphi_{im}$ ) .....	46
➤ <b>Figura 4.1.</b> Esquema circuito indirecto de detección (izquierda) y montaje de laboratorio (derecha).....	48
➤ <b>Figura 4.2.</b> Diagrama esquemático .....	50
➤ <b>Figura 4.3.</b> Pulso completo de PD .....	51
➤ <b>Figura 4.4.</b> Apertura de archivos y su código .....	51
➤ <b>Figura 4.5.</b> Escalado de amplitud .....	52
➤ <b>Figura 4.6.</b> Filtrado por fase y <i>trigger</i> .....	52
➤ <b>Figura 4.7.</b> Identificación automática .....	53
➤ <b>Figura 4.8.</b> Interfaz de usuario (primera pestaña).....	53
➤ <b>Figura 4.9.</b> Interfaz de usuario (segunda pestaña) .....	54
➤ <b>Figura 4.10.</b> Interfaz de usuario (tercera pestaña) .....	55
➤ <b>Figura 4.11.</b> Cargar archivos de datos .....	55
➤ <b>Figura 4.12.</b> Visualización de datos.....	56
➤ <b>Figura 4.13.</b> Ajuste escalado.....	56
➤ <b>Figura 4.14.</b> Cálculo parámetros estadísticos .....	57
➤ <b>Figura 4.15.</b> Inicio del filtrado .....	57

➤ <b>Figura 4.16.</b> Ejemplo de filtrado en fase y amplitud .....	58
➤ <b>Figura 4.17.</b> Identificación automática .....	58
➤ <b>Figura 4.18.</b> Gráficos estadísticos.....	59
➤ <b>Figura 5.1.</b> PRPD corona 2700v1 (izquierda) y tabla de resultados (derecha).....	61
➤ <b>Figura 5.2.</b> Resultados corona 2700v1: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo) .....	61
➤ <b>Figura 5.3.</b> PRPD corona 2700v5 (izquierda) y tabla de resultados (derecha).....	61
➤ <b>Figura 5.4.</b> Resultados corona 2700v5: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo) .....	62
➤ <b>Figura 5.5.</b> PRPD corona cor (izquierda) y tabla de resultados (derecha) .....	62
➤ <b>Figura 5.6.</b> Resultados corona cor: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo) .....	63
➤ <b>Figura 5.7.</b> PRPD corona tr 7kV (izquierda) y tabla de resultados (derecha) .....	63
➤ <b>Figura 5.8.</b> Resultados corona tr 7kV: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo) .....	64
➤ <b>Figura 5.9.</b> PRPD corona trin 5kV (izquierda) y tabla de resultados (derecha) .....	64
➤ <b>Figura 5.10.</b> Resultados corona trin 5kV: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo) .....	64
➤ <b>Figura 5.11.</b> PRPD superficiales lámina_1-8kV_elecgrande (izquierda) y tabla de resultados (derecha) .....	65
➤ <b>Figura 5.12.</b> Resultados corona lámina_1-8kV_elecgrande: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo). .....	65
➤ <b>Figura 5.13.</b> PRPD superficiales lámina_1-8kV (izquierda) y tabla de resultados (derecha) .....	66
➤ <b>Figura 5.14.</b> Resultados superficiales lámina_1-8kV: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo) .....	66
➤ <b>Figura 5.15.</b> PRPD superficiales nomex1200 (izquierda) y tabla de resultados (derecha) .....	67
➤ <b>Figura 5.16.</b> Resultados superficiales nomex1200: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo) .....	67
➤ <b>Figura 5.17.</b> PRPD superficiales nomex1600 (izquierda) y tabla de resultados (derecha) .....	68
➤ <b>Figura 5.18.</b> Resultados superficiales nomex1600: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo) .....	68
➤ <b>Figura 5.19.</b> PRPD superficiales par (izquierda) y tabla de resultados (derecha) ....	69
➤ <b>Figura 5.20.</b> Resultados superficiales par: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo) .....	69
➤ <b>Figura 5.21.</b> PRPD internas 8kV_1+1+1_3vacuolas1 (izquierda) y tabla de resultados (derecha) .....	70
➤ <b>Figura 5.22.</b> Resultados internas 8kV_1+1+1_3vacuolas1: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo) .....	70

➤ <b>Figura 5.23.</b> PRPD internas 2vacuolas_7kV (izquierda) y tabla de resultados (derecha) .....	71
➤ <b>Figura 5.24.</b> Resultados internas 2vacuolas_7kV: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo) .....	71
➤ <b>Figura 5.25.</b> PRPD internas meta_14kV (izquierda) y tabla de resultados (derecha) .....	71
➤ <b>Figura 5.26.</b> Resultados internas meta_14kV: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo) .....	72
➤ <b>Figura 5.27.</b> PRPD internas 4kV_1+1+1_2vacuolas (izquierda) y tabla de resultados (derecha) .....	72
➤ <b>Figura 5.28.</b> Resultados internas 4kV_1+1+1_2vacuolas: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo) .....	73
➤ <b>Figura 5.29.</b> PRPD internas 8kV_1+1+1_3vacuolas3 (izquierda) y tabla de resultados (derecha) .....	73
➤ <b>Figura 5.30.</b> Resultados internas 8kV_1+1+1_3vacuolas3: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo) .....	74
➤ <b>Figura 5.31.</b> PRPD internas metacrilato_12kV (izquierda) y tabla de resultados (derecha) .....	74
➤ <b>Figura 5.32.</b> Resultados internas metacrilato_12kV: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo) .....	75
➤ <b>Figura 5.33.</b> PRPD corona 1 (izquierda) y tabla de resultados (derecha).....	77
➤ <b>Figura 5.34.</b> PRPD corona 2 (izquierda) y tabla de resultados (derecha).....	77
➤ <b>Figura 5.35.</b> PRPD corona 3 (izquierda) y tabla de resultados (derecha).....	78
➤ <b>Figura 5.36.</b> Árbol de decisión II.....	79
➤ <b>Figura 5.37.</b> Comprobación corona 2700v1: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo) .....	79
➤ <b>Figura 5.38.</b> Comprobación corona 2700v5: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo) .....	80
➤ <b>Figura 5.39.</b> Comprobación corona cor: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo) .....	80
➤ <b>Figura 5.40.</b> Comprobación corona tr 7kV: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo) .....	81
➤ <b>Figura 5.41.</b> Comprobación corona trin 5kV: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo) .....	81
➤ <b>Figura 7.1.</b> Información Tareas .....	87
➤ <b>Figura 7.2.</b> Diagrama de Gantt .....	88

# Lista de tablas

---

◀ <b>Tabla 2.1.</b> Permitividades reactivas de distintos dieléctricos .....	8
◀ <b>Tabla 3.1.</b> Resultados ensayo punta-plano.....	28
◀ <b>Tabla 3.2.</b> Resultados ensayo tridente.....	29
◀ <b>Tabla 3.3.</b> Resultados ensayo Internas 1 .....	31
◀ <b>Tabla 3.4.</b> Resultados ensayo Internas 2 .....	32
◀ <b>Tabla 3.5.</b> Resultados ensayo Internas 3 .....	33
◀ <b>Tabla 3.6.</b> Resultados ensayo par trenzado .....	34
◀ <b>Tabla 3.7.</b> Resultados ensayo lámina .....	35
◀ <b>Tabla 3.8.</b> Resultados Ruido .....	36
◀ <b>Tabla 3.9.</b> Valores umbrales I.....	39
◀ <b>Tabla 3.10.</b> Valores umbrales II.....	40
◀ <b>Tabla 3.11.</b> Valores de $\varphi_{im}$ (arriba) y de $\varphi_{em}$ (abajo).....	44
◀ <b>Tabla 3.12.</b> Valores umbrales III .....	45
◀ <b>Tabla 5.1.</b> Valores umbrales IV .....	78
◀ <b>Tabla 8.1.</b> Costes de personal .....	89
◀ <b>Tabla 8.2.</b> Costes de instalaciones .....	90
◀ <b>Tabla 8.3.</b> Costes de elementos software y hardware .....	90

# Capítulo 1

---

## Introducción

Una de las causas más frecuentes de fallo de una instalación o equipamiento eléctrico es la ruptura de su aislamiento [1]. Por ello, es de vital importancia conocer el estado y la evolución del material aislante.

En la actualidad, los ensayos más utilizados para la certificación de la calidad del aislamiento de equipos de Alta Tensión son: La medida de la resistencia de aislamiento; los ensayos de alta tensión soportada y sobretensión transitoria; la medida de capacidad y factor de disipación; la medida de descargas parciales; el análisis de gases disueltos en el aceite, etc.

Entre estas técnicas, la medida de descargas parciales (*“Partial Discharges”*, PDs), debido a la capacidad de diagnóstico de muchos tipos de fallos y a su aplicación tanto en máquinas como en cables aislados, ha tenido una evolución notable durante la segunda mitad del siglo XX [2]. Las descargas parciales, ionizaciones de baja energía en el seno del aislamiento sólido/líquido, normalmente no suponen la ruptura inmediata del aislamiento, aunque sí una continua degradación que acorta la vida de éste. Gracias a su estudio, hoy en día podemos ser capaces no sólo de prever el fallo del aislamiento de un equipo eléctrico, sino también de localizar la fuente de las descargas parciales y estimar el alcance del daño. Esto se debe a que, aunque las descargas parciales son causa de envejecimiento, principalmente son consecuencia de otros mecanismos de degradación [3], [4].

Es necesario mencionar que la información aportada por este método no proporciona parámetros cuantitativos deterministas, sino otros de carácter estadístico. Se debe llevar a cabo un seguimiento continuo del equipo en cuestión, con la realización de mediciones de descargas parciales de forma periódica. El análisis y comparación de distintas mediciones en las mismas condiciones de ensayo, da una idea de la tendencia

del envejecimiento del aislamiento [5]. Además, el conocimiento de la evolución temporal de las descargas parciales permite detectar reducciones de vida útil del material dieléctrico.

Las conclusiones a las que se llegan con esta práctica son de gran utilidad, permitiendo un importante ahorro económico, ya que una vez diagnosticado el posible fallo, se puede planificar un mantenimiento adecuado del equipo. Por contra, las consecuencias de no llevar a cabo este análisis y su correcto mantenimiento son, además de acortar la vida del equipo, el fallo de la máquina o del cable aislado y su salida de servicio, con las pérdidas económicas que esto conlleva.

Como paso previo a la evaluación del estado del aislamiento, hay que determinar qué fuente de descargas parciales está activa, es por ello que el propósito de este trabajo consiste en diseñar un módulo de procesamiento de patrones resueltos en fase de descargas parciales. Para el diseño de este *software* se utilizará el entorno de programación *LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench)*, el cual posee un lenguaje de programación visual gráfico.

Uno de los objetivos de este sistema es la posibilidad de que el usuario pueda realizar un filtrado por *trigger* y fase. Este filtrado puede resultar muy eficaz, ya que permite al usuario analizar un determinado *cluster* de pulsos, pudiendo excluir del estudio las descargas que se deseen, porque, se consideren fenómenos asociados a ruido que no sirvan para el diagnóstico.

El objeto final de este programa es la identificación automática de fuentes de descargas parciales que oriente a un operador del *software* que no sea un experto en esta tarea. Para esta clasificación, se programará un algoritmo de decisión probabilístico, el cual se apoyará en los marcadores estadísticos que ofrezcan un comportamiento más estable.

Con estos objetivos se ha desarrollado este sistema, el cual se convertirá en un nuevo activo del Laboratorio de Investigación y Ensayos en Alta Tensión (LINEALT) de la Universidad Carlos III de Madrid. Además, esta herramienta se podrá unir como complemento al *software* de procesamiento, filtrado y análisis de descargas parciales desarrollado por la Universidad Carlos III de Madrid (*LINEALT\_PROCESSING*), aumentando así sus prestaciones.

El proyecto constará de un Capítulo 2, en el que se realiza una breve introducción al fenómeno de PD. En el Capítulo 3, se caracterizará cada tipología de descarga parcial y se diseñará el sistema de identificación automática. El Capítulo 4 servirá a modo de manual de usuario del *software* implementado. En el Capítulo 5 se pondrá a prueba la fiabilidad del algoritmo de clasificación desarrollado. Finalmente, en el Capítulo 6 se expondrán las conclusiones y aportaciones hechas por este trabajo. Además, se presentará un cronograma con la planificación de tareas seguida en la elaboración de este proyecto y un presupuesto con sus respectivos costes.

## Estado del arte

### 2.1. DEFINICIÓN DE DESCARGA PARCIAL

Las descargas parciales son pequeñas rupturas dieléctricas localizadas en una pequeña región de aislamiento eléctrico. El arco formado provoca un fallo parcial del aislamiento, el cual tiene un carácter transitorio, con un tiempo de duración muy corto y un bajo contenido energético.

Como sabemos, la función del aislamiento es la de separar dos partes de un equipo eléctrico que se encuentran a distinto potencial, y por lo tanto, soportar el correspondiente campo eléctrico. El valor máximo de campo que puede soportar un sistema de aislamiento se denomina rigidez dieléctrica, que suele ser muy superior al aplicado en condiciones nominales. No obstante, por regla general, las descargas parciales se producen a causa de una amplificación del campo eléctrico, en zonas de menor rigidez dieléctrica, lo que explica que se presenten para tensiones de operación nominales. Algunas de las causas más habituales de que se produzca esta amplificación del campo eléctrico en una determinada región son: burbujas, huecos, impurezas, grietas o degradación de la homogeneidad (interfaces cobre-aislamiento o aislamiento-chapa), metales afilados, etc.

Hay que tener en cuenta que, a causa de los grandes volúmenes de aislamiento que necesitan los equipos de Alta Tensión, es imposible evitar la existencia de alguno de los defectos mencionados anteriormente.

### 2.2. MECANISMOS DE IONIZACIÓN DE LOS GASES

La ionización es un fenómeno por el cual, un elemento aislante como es el gas, que se encuentra sometido a un campo eléctrico, se vuelve conductor permitiendo el

paso de corriente. Este fenómeno explica, además de la ruptura total del aislamiento gaseoso, la ruptura parcial de un sistema de aislamiento sólido-gas (descargas parciales).

### 2.2.1. Mecanismo “serpentina” Streamer

El principio físico en el que se basa este mecanismo es el de distribución de carga espacial que producen las cargas. Los electrones iniciales (procedentes de radiación ionizante del medio ambiente o de enlaces químicos rotos de polímeros) una vez se ionizan provocan una avalancha, la cual hace que los electrones se dirijan al ánodo y los iones positivos, que son mucho más lentos, al cátodo. En un momento dado, los electrones en la cabeza de la avalancha hacen que se intensifique el campo eléctrico entre ellos y el ánodo, al mismo tiempo, se intensifica el campo eléctrico entre los iones positivos y el cátodo.

Sin embargo, entre el frente de electrones rápidos y los iones positivos lentos se produce un campo eléctrico que se opone al externo. Se denomina carga espacial a esta carga que produce un campo eléctrico que se opone al externo. Cuando esta carga acumulada alcance una densidad tal, que pueda producir un campo eléctrico inducido de la misma magnitud que el externo, entonces se producirá la ionización [6].

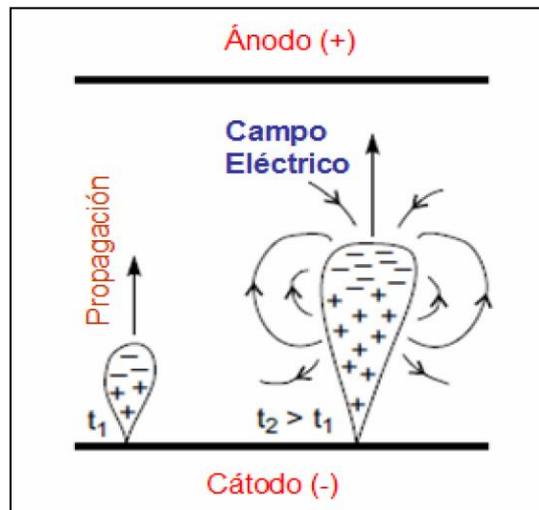


Figura 2.1. Mecanismo Streamer

### 2.2.2. Evolución de la corriente en un gas

La ionización de las moléculas de un gas se produce a causa de las colisiones de los electrones. En la Figura 2.2 se observa la evolución de la corriente en un gas al aumentar la tensión aplicada:

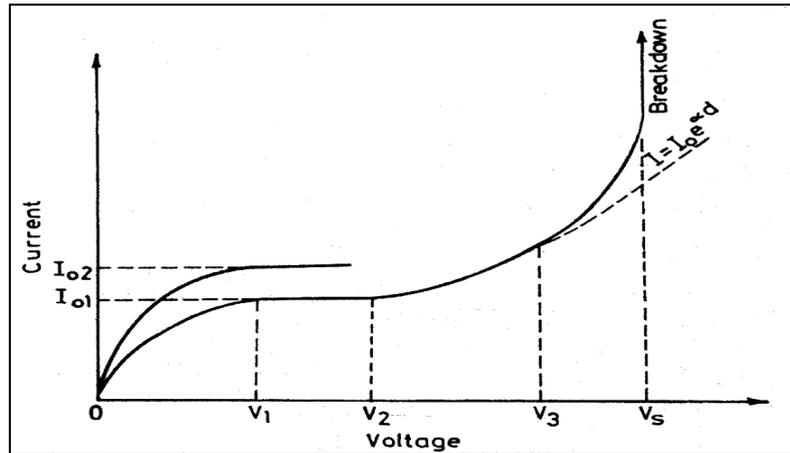


Figura 2.2. Corriente en un gas frente a la tensión aplicada

En la Figura 2.2 se distinguen tres zonas:

- En una primera zona al aumentar la tensión, la corriente aumenta casi de forma proporcional. Esto ocurre debido a que al aumentar la tensión, los electrones libres que hay en el gas se aceleran, produciendo un aumento de la corriente.
- En la segunda región se aprecia cómo ante un aumento de la tensión, la corriente apenas aumenta. Esto se debe a la saturación de la corriente, ya que no hay más electrones libres que los generados por la radiación natural.
- En una tercera parte, aumentado la tensión por encima de un determinado valor, la aceleración de los electrones es tan alta, que producen ionizaciones de moléculas neutras por colisión (ionización primaria), provocando un aumento notable de la corriente. Cuando la tensión se acerca a la tensión disruptiva (*breakdown voltage*), la corriente aumenta de forma exponencial. En este punto, a la ionización primaria se le suma la secundaria, la cual consiste en el bombardeo de iones en cátodo liberando más electrones y/o la ruptura de los enlaces químicos de moléculas neutras, lo que dan lugar a pares ión-electrón que se añaden a los portadores libres existentes [7].

### 2.2.3. Curvas Paschen

Paschen estableció la tensión mínima o de ignición a partir de la cual se puede producir la ruptura de un gas. Esta tensión viene dada por la siguiente ecuación:

$$V_b = \frac{B * (P * d)}{\ln\left(\frac{A * (P * d)}{K}\right)} \quad (2.1)$$

A partir de esta ecuación se observa cómo la tensión de ignición depende de A, B y K, que son constantes que dependen del gas [6]. Además, la tensión depende del producto (P\*d), es decir, de la presión del gas y de la distancia entre los electrodos. En la siguiente figura se pueden ver las curvas Paschen de diferentes gases:

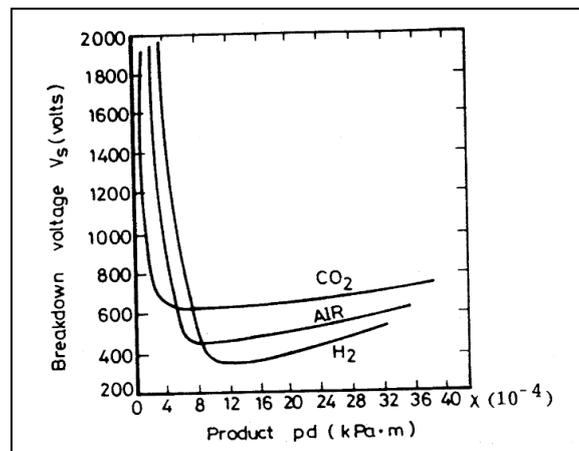


Figura 2.3. Curvas Paschen para varios gases

Las curvas Paschen contienen dos zonas bien diferenciadas en función del producto (P\*d) de cada gas:

- Para valores  $P*d < (P*d)_{\text{mín}}$ , la tensión de ignición es muy elevada con tendencia decreciente según este parámetro. Esto se debe a que el número de impactos es escaso. Es típico en gases a bajas presiones.
- Para valores  $P*d > (P*d)_{\text{mín}}$ , la tensión de ignición es también elevada, aunque creciente según este producto. Las colisiones son demasiado abundantes, lo que provoca que la energía cinética de los electrones nunca sea suficiente como para producir la ionización. Normalmente, debido a las condiciones del aislamiento y al tamaño típico de las vacuolas, el gas en su interior se suele encontrar en esta región [7].

## 2.3. MODELADO DE DESCARGAS PARCIALES

Para entender mejor por qué se producen las descargas parciales y cómo modelarlas, se procederá a analizar de manera simplificada la distribución del campo eléctrico en sistemas con distintos materiales dieléctricos.

### 2.3.1. Distribución del campo eléctrico

Para entender cómo se reparte el campo eléctrico, se supondrá un campo eléctrico AC (corriente alterna) perpendicular a la frontera de dos capas de dieléctrico plano-paralelas, tal y como se observa en la Figura 2.4, se puede modelar como un condensador con dos dieléctricos:

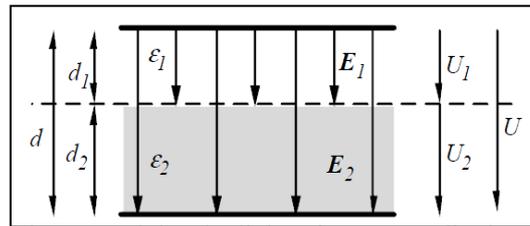


Figura 2.4. Capas plano-paralelas de dieléctrico perpendiculares al campo eléctrico AC

En el caso de aplicar un campo externo perpendicular a la frontera de separación de los dos dieléctricos, la dependencia entre los campos eléctricos viene dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}} \quad (2.2)$$

A partir de la Figura 2.4 se debe verificar que:

$$U = U_1 + U_2 = E_1 * d_1 + E_2 * d_2 \quad (2.3)$$

Por lo que el campo que soporta cada dieléctrico será:

$$E_1 = \frac{U}{d_1 + d_2 \frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}}} \quad E_2 = \frac{U}{d_2 + d_1 \frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}}} \quad (2.4) \quad (2.5)$$

De estas ecuaciones se pueden extraer varias conclusiones: La primera de ellas es que el campo eléctrico se incrementa en el material con menor permitividad relativa ( $\epsilon_r$ ); además, este efecto será tanto más notable cuanto menor sea el espesor de dicho material [8].

En la Figura 2.5 se puede apreciar cómo se acentúa la desigualdad de la distribución del campo eléctrico a medida que aumenta la diferencia entre las permitividades relativas de los dieléctricos y la diferencia entre sus espesores:

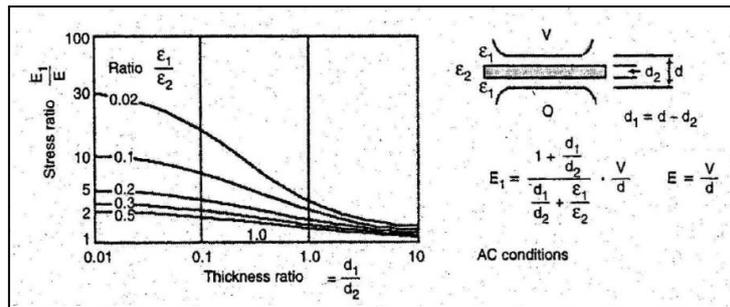


Figura 2.5. Reparto de campos eléctricos en AC (extraído de [1])

Para tener una idea del orden de magnitud, la Tabla 2.1 muestra los valores de permitividad relativa de los principales materiales aislantes usados actualmente en equipos de Alta Tensión:

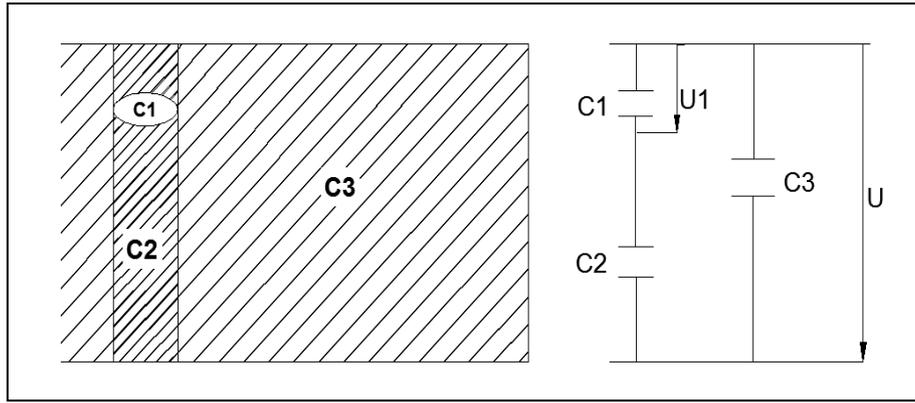
Material	$\epsilon_r$
Aire	1
Papel	3,7
Aceite mineral	2,2
Mica	5,4
Silicona	2,9
XLPE	2,4
EPR	3,3
LDPE	2,2- 2,3
Resina Epoxi	3,5- 5

Tabla 2.1. Permitividades relativas de distintos dieléctricos

### 2.3.2. Circuito equivalente de modelado de actividad de descargas parciales

La medida y visualización de descargas parciales está basada en la detección de pequeñas corrientes que circulan por el circuito de medida. Estos desplazamientos de corriente son consecuencia directa de las avalanchas electrónicas que se producen en los diferentes defectos del aislamiento (véase 2.2).

El circuito equivalente utilizado para el modelado de descargas parciales es el modelo ABC de Whitehead. Tal y como se puede ver en la Figura 2.6, este modelo consiste, esencialmente, en un circuito con tres condensadores [9]:



**Figura 2.6. Modelo eléctrico de aislante con vacuola**

En la Figura 2.6,  $C_1$  representa la cavidad donde se producen las descargas parciales,  $C_2$  representa el aislamiento por encima y por debajo de la cavidad y la capacidad  $C_3$  equivale a la capacidad del resto del material aislante sano.

Por lo tanto, la tensión que aparece en  $C_1$  puede expresarse de la siguiente forma:

$$U_1(t) = U(t) * \frac{C_2}{C_1 + C_2} \quad (2.6)$$

En la Figura 2.7 se muestra el patrón resuelto en fase de descargas parciales (“*Phase Resolved Partial Discharge patterns*”, PRPD patterns) de una cavidad sometida a corriente alterna. En este patrón vemos que cuando la tensión  $U_1$  alcanza la tensión de ruptura dieléctrica, tanto para polaridad positiva como para la negativa, se produce la descarga disruptiva. Esta descarga produce una corriente eléctrica que puede ser medida en un circuito de detección específico. Tras esa caída de potencial  $U_1$ , la tensión en la vacuola sigue creciendo según la tensión alterna aplicada, hasta que se alcance la tensión de ruptura de la vacuola otra vez.

Por tanto, las descargas parciales dan lugar a sucesiones de pulsos de corriente con cierta correlación con la fase de la tensión aplicada. La magnitud de carga eléctrica desplazada, en primera aproximación, está directamente relacionada con el tamaño del defecto [10], mientras que la tasa de repetición del fenómeno depende del número de vacuolas presentes en el material.

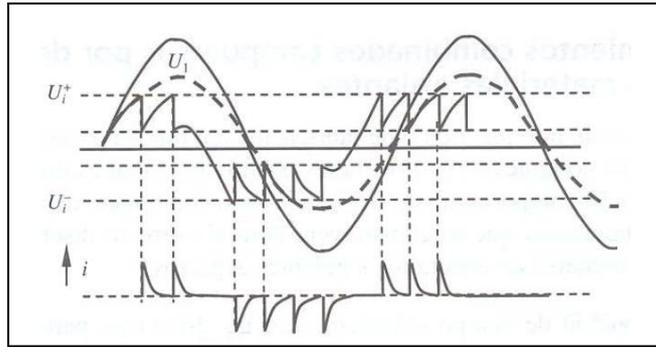


Figura 2.7. Descargas parciales en una cavidad sometida a corriente alterna

### 2.3.3. Unidades de medida de descargas parciales

Para la medición de la magnitud de las descargas parciales se utilizan las siguientes unidades:

- MiliVoltios (mV): Aplicable para objetos inductivos.
- PicoCulombios (pC): Esta unidad es la más utilizada en laboratorios o fábricas, se aplica para objetos capacitivos. Representa la carga aparente de la descarga parcial, por lo que requiere calibración para cada objeto de medida (véase 2.4.3).
- MiliAmperios (mA): Se utiliza cuando se realizan las medidas mediante transformadores de corriente.
- Decibelios (dBm): Cuando se utilizan analizadores de espectros.

## 2.4. DETECCIÓN DE DESCARGAS PARCIALES

Los distintos métodos de detección de descargas parciales están basados en las diferentes consecuencias o efectos que las PDs ocasionan cuando se producen. Algunos de estos efectos son:

- Emisión de radiación electromagnética en distintos rangos del espectro de radio-frecuencia, radiación ultravioleta y rayos X.
- Ataque químico causado por la formación de ciertos gases como el ozono.
- Calentamiento del dieléctrico debido a la potencia eléctrica disipada en forma de calor.
- Ruido en frecuencias audibles o ultrasónicas.
- Pulsos de corriente debido a la carga desplazada.

### 2.4.1. Métodos no eléctricos

Estos métodos por regla general tienen menor sensibilidad que los métodos eléctricos. En muchos casos, la aplicación de alguna de estas prácticas es tan compleja,

que no se puede utilizar en un entorno industrial. Algunos de estos métodos se describen a continuación:

- **Método químico:** Este método se utiliza principalmente para el análisis de los gases disueltos en el aceite de transformadores. La evolución de la concentración de determinados gases (acetileno, metano, hidrógeno, etileno, ozono y dióxido de carbono) permite detectar descargas parciales, sobrecalentamientos u otros fallos. En el caso de la aparición de descargas parciales, el aumento de la concentración de hidrógeno suele ser el mejor indicativo [11].

En la actualidad, este método se está empezando a utilizar en subestaciones *GIS* (*Gas Insulated Switchgear*), las cuales utilizan como aislamiento  $\text{SF}_6$  (Hexafluoruro de azufre). La presencia de descargas parciales se asocia con la presencia de ciertos subproductos químicos como  $\text{SOF}_2$  y  $\text{SO}_2\text{F}_2$  [12].

Los principales inconvenientes de este método son la incapacidad de determinar la ubicación exacta del fallo y la complejidad a la hora de cuantificar la actividad de descargas parciales.

- **Método óptico:** Esta técnica se basa en la detección de emisión lumínica producida por las descargas parciales. Principalmente se utiliza para detectar descargas del tipo corona (véase 2.5.3) en aisladores, pasatapas, herrajes o cables desnudos. La detección de este tipo de descargas se realiza mediante cámaras de luz ultravioleta a cierta distancia del foco de emisión, lo que resulta muy útil para inspecciones de líneas aéreas [13].

El inconveniente de esta técnica radica en la imposibilidad de calibración, lo que se debe a que el espectro óptico es variable, dependiente de factores como la intensidad de descarga, la temperatura o la presión del sistema aislante.

- **Método acústico:** Esta práctica consiste en la detección de las ondas mecánicas producidas por las descargas parciales, lo cual se consigue generalmente mediante sensores piezoeléctricos. Debido a las características de estas ondas, su propagación sólo es buena en aceite, por lo que su aplicación está prácticamente limitada a transformadores [14].

Aunque este método permite medir la magnitud de las descargas, determinar su localización y es inmune al ruido electromagnético, es susceptible al acoplamiento de otras señales acústicas que provengan del exterior.

### 2.4.2. Método RF

Esta técnica trata de detectar los pulsos de radiofrecuencia producidos por las descargas parciales. Su utilización está muy extendida en transformadores, máquinas eléctricas rotativas, subestaciones *GIS*, interruptores aislados con gas, etc.

Los sensores para poder captar estos pulsos son antenas. Actualmente se utilizan diferentes rangos de medida de frecuencia:

- Entre 3 MHz y 300 MHz se considera alta frecuencia (*HF, High Frequency*) y muy alta frecuencia (*VHF, Very High Frequency*).
- Entre 300 MHz y 3 GHz se considera ultra alta frecuencia (*UHF, Ultra High Frequency*).

Los principales inconvenientes de este método son la imposibilidad de determinar, ni la magnitud de carga eléctrica desplazada, ni la identificación de la polaridad de los pulsos.

Por otro lado, entre las ventajas más destacadas de este método se encuentra la localización de la fuente de descargas, lo que se consigue mediante el procesamiento digital de los tiempos de llegada de las señales al detector; además, debido a las altas frecuencias que utiliza, este sistema de detección es, en cierta medida, inmune al ruido (las fuentes de interferencia están muy claras, como pueden ser FM, TV o WiFi); por último, hay que resaltar esta técnica por su alta sensibilidad (aunque menor que las eléctricas) y su utilización para medidas en servicio [15].

### 2.4.3. Método eléctrico

Este trabajo está basado en este método, que consiste en la medición de las corrientes producidas por los pulsos de descargas parciales que circulan por un circuito de medida.

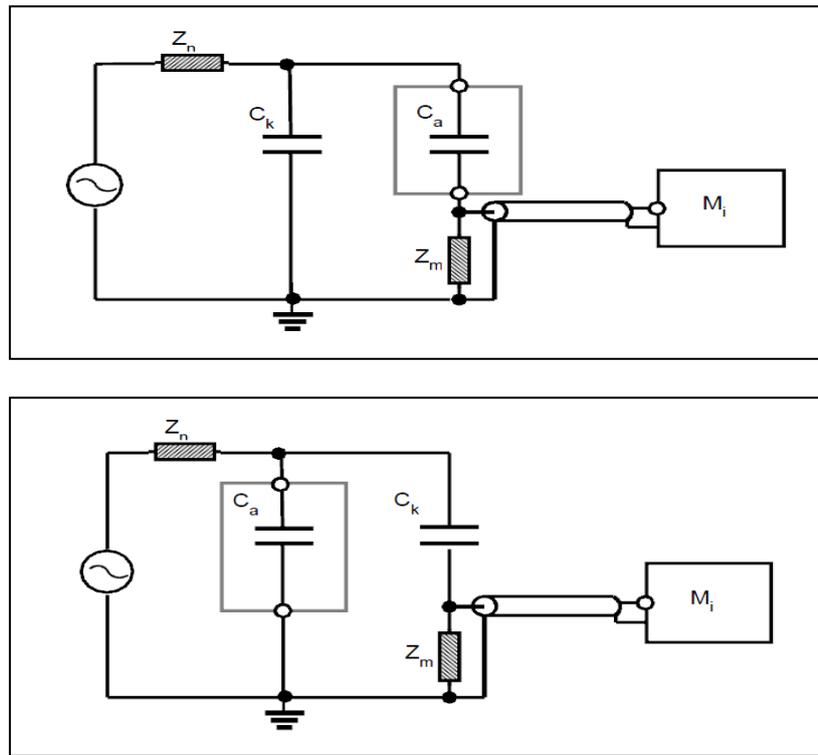
Hay que tener en cuenta que la magnitud de la carga que circula por el circuito de medida, no es la misma que la magnitud de la carga asociada a la avalancha electrónica (carga “física”) que se ha producido en el aislamiento, por lo que es necesario definir el concepto de carga aparente.

La norma *UNE- 21313* define la carga aparente de un pulso de descarga parcial como la carga que, si se inyecta en un tiempo muy corto entre los terminales del objeto de ensayo, daría la misma lectura en el instrumento de lectura que el pulso de corriente en la descarga parcial.

Para un mismo objeto de ensayo y sensor, la relación entre carga medida y aparente se mantiene constante. Por ello, para determinar esta conversión entre pulso medido y carga aparente, se genera una transferencia de carga conocida en los terminales del equipo bajo prueba mediante un calibrador externo.

### 2.4.3.1. Circuitos de medida

De acuerdo con la norma *IEC 60270*, los circuitos recomendados y más utilizados actualmente se pueden ver en la Figura 2.8 [16]:



**Figura 2.8.** Esquema circuito de detección directo (arriba) e indirecto (abajo)  
(extraído de [17])

Cada uno de estos circuitos se compone principalmente de:

- Una fuente de alta tensión libre de descargas parciales.
- Un filtro de bloqueo  $Z_n$ , con el objetivo de reducir las perturbaciones generadas en la fuente y evitar que las descargas parciales producidas en el objeto de ensayo circulen por el lazo de la fuente de tensión.
- Un objeto de ensayo, cuyo comportamiento se puede aproximar como una capacidad,  $C_a$ .
- Un condensador de acoplamiento  $C_k$ , para facilitar el paso de los pulsos de corriente de alta frecuencia. El valor de este condensador afecta a la sensibilidad de las medidas y sobre el valor de medida de la carga aparente.
- Una impedancia de medida  $Z_m$ , a través de la cual circulan las descargas parciales. En sus extremos se miden las tensiones producidas por las corrientes.

La única diferencia entre la utilización del circuito directo o el indirecto es la polaridad de los pulsos registrados, que será contraria. Sin embargo, el circuito más utilizado suele ser el indirecto, ya que este circuito protege mejor a la impedancia y a la

instrumentación de medida en caso de producirse la ruptura del objeto durante un ensayo.

Debido a que la forma de los pulsos puede variar entre distintos circuitos de medida, mediante un proceso de calibración, se deberá establecer la proporcionalidad existente entre la carga aparente y la carga medida.

## 2.5. TIPOS DE DESCARGAS PARCIALES

Las descargas parciales no afectan a todos los aislamientos de igual manera. Hay determinados tipos de aislamientos que pueden soportar un cierto grado de descargas parciales, un ejemplo serían los aislamientos basados en Mica. La caracterización de descargas parciales se ha hecho tradicionalmente, mediante la identificación de patrones resueltos en fase de la tensión aplicada (*“Phase Resolved Partial Discharge patterns”*, PRPD patterns) de las descargas parciales [18]. Dependiendo del medio existente entre los electrodos, se pueden distinguir tres tipos de descargas parciales:

### 2.5.1. Descargas parciales internas

Esta tipología de descargas se suelen producir en vacuolas de gas de baja permitividad relativa localizadas en el interior de aislamientos sólidos o burbujas de gas en aislamientos líquidos. También pueden encontrarse en la frontera entre el aislamiento y el electrodo, en grietas en el aislamiento o incrustaciones de partículas extrañas.

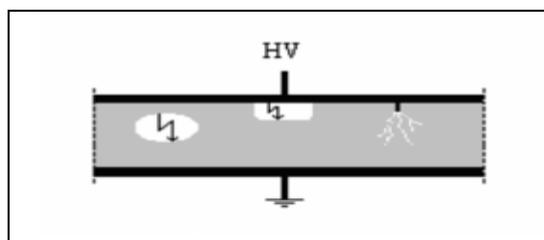
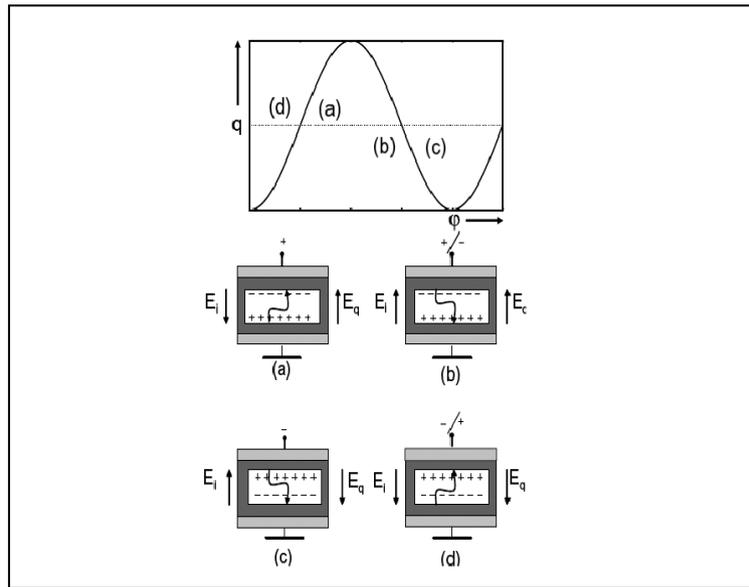


Figura 2.9. Ejemplos de varios tipos de descargas parciales internas

Como se explicó anteriormente (véase 2.3.1), el campo eléctrico se intensifica en el dieléctrico con menor permitividad dieléctrica, en este caso en el defecto. En la Figura 2.10 se aprecia cómo la carga, depositada por anteriores descargas en las paredes de la cavidad, se distribuirá en función de su polaridad, lo que provocará acumulaciones de carga espacial. Esta carga espacial, originará un campo eléctrico inducido ( $E_q$ ) que se superpondrá al campo eléctrico externo aplicado ( $E_a$ ). En el caso de que el objeto de ensayo estuviese sometido a tensión alterna, en el cambio de polaridad el campo resultante se ve intensificado como consecuencia de la superposición del campo

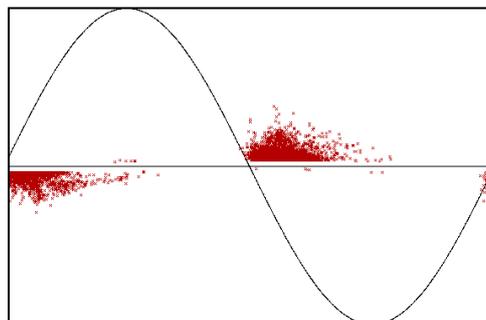
inducido ( $E_t = E_a + E_q$ ). Esto se debe a que la carga acumulada mantiene su polaridad hasta que ésta se vuelve a redistribuir tras otra descarga [19].



**Figura 2.10. Descargas parciales producidas en la cavidad de un dieléctrico**

Hay que destacar que las descargas parciales son consecuencia de defectos previos creados por otros mecanismos de envejecimiento. Lo que sucede, a su vez, es que las descargas parciales pueden degradar todavía más el material una vez que están presentes.

Los patrones de este tipo de descargas se caracterizan por la gran variabilidad estadística de sus magnitudes detectadas, aunque las descargas de menor magnitud suelen tener una probabilidad mucho mayor. Como se mencionó anteriormente, son altamente probables para las transiciones de 0V de la tensión aplicada. En la Figura 2.11 se muestra un patrón característico de descargas parciales internas captado con el *software LINEALT\_PROCESSING*:



**Figura 2.11. Patrón típico de descargas parciales internas**

### 2.5.2. Descargas parciales superficiales

Se producen en las interfaces entre dos dieléctricos, en la mayoría de las ocasiones sólido-aire, debido a la presencia de componentes tangenciales del campo eléctrico que las originan. Aunque la humedad, suciedad o contaminación pueden acelerar la aparición de este fenómeno, si se identifican correctamente, la limpieza de la superficie aislante puede eliminarlas.

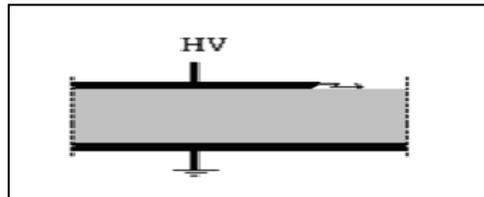


Figura 2.12. Descarga parcial superficial

Este tipo de descargas suelen aparecer en terminales de cables, aisladores, pasatapas y bornas. El patrón de las descargas superficiales se caracteriza por una alta variabilidad de la magnitud detectada y, además, en que estas descargas se producen en los momentos en los que la onda de tensión está en sus máximos. Un patrón típico PRPD de descargas parciales superficiales se puede ver en la Figura 2.13:

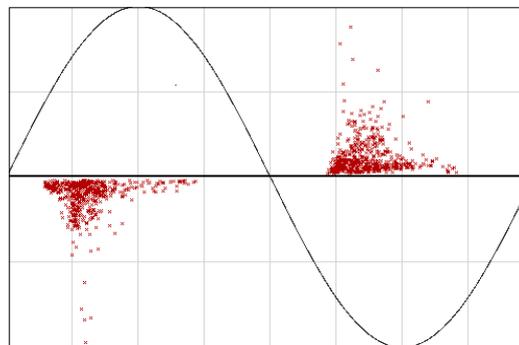
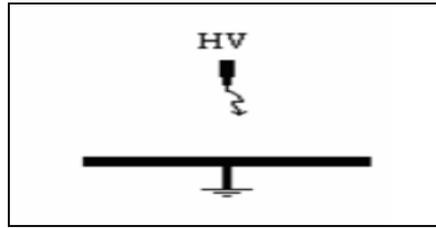


Figura 2.13. Patrón típico de descargas parciales superficiales

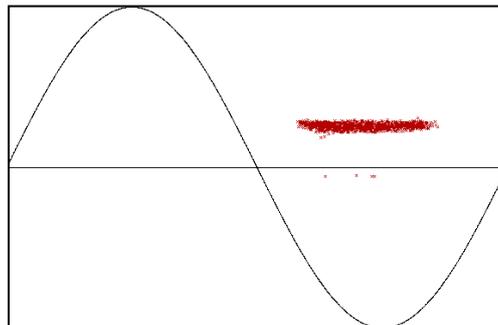
### 2.5.3. Descargas parciales corona

Este tipo de descargas no suelen ser dañinas, ya que al producirse en zonas afiladas o conductores con poco radio de curvatura dentro de gases o dieléctricos líquidos, si se identifican, se pueden eliminar. Se producen debido a que los altos gradientes de campo eléctrico hacen que se produzca la ionización del gas que se encuentra alrededor de geometrías puntiagudas.



**Figura 2.14. Descarga parcial corona**

El patrón de las descargas corona es muy singular, ya que siempre aparecen en el semiciclo negativo y con una magnitud de descarga prácticamente constante. Aun así, en ciertas ocasiones si las tensiones son muy altas, pueden aparecer pulsos en el semiciclo positivo. En la Figura 2.15 se muestra un patrón característico PRPD de descargas parciales corona:



**Figura 2.15. Patrón típico de descargas parciales corona**

## **2.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA IDENTIFICACIÓN DE FUENTES DE DESCARGAS PARCIALES**

La aparición de las descargas parciales en un equipo de Alta Tensión depende de multitud de factores variantes e impredecibles. Algunos de estos factores son la geometría de los defectos, su naturaleza y evolución a lo largo del tiempo causada por el envejecimiento del aislamiento, la tensión aplicada, permitividad del dieléctrico, factores ambientales y, especialmente importantes, radiación ionizante y electrones libres iniciadores de la primera avalancha.

Por todo esto, la magnitud, evolución y tasa de aparición de las descargas parciales es un fenómeno estocástico variable en el tiempo y por tanto, debe ser estudiado estadísticamente. A continuación, se detallarán los principales parámetros estadísticos utilizados para el estudio e interpretación de los patrones PRPDs:

### 2.6.1. Parámetros estadísticos en amplitud

Debido al carácter estocástico de las descargas parciales, la medida de un solo evento no es significativa, y por esta razón a los pulsos captados se les debe dar un tratamiento estadístico. La herramienta más utilizada para caracterizar las PDs en términos de magnitud es la distribución probabilística de Weibull  $F(q)$  [20].

A pesar de estas características, la distribución sólo es completamente válida si los pulsos de PDs que pertenecen a diversos fenómenos tienen distribuciones de amplitud y/o fase que no se solapan totalmente. Es una función estadística de carácter acumulativo, cuya ecuación viene determinada por:

$$F(q) = 1 - e^{-\left(\frac{q}{\alpha}\right)^\beta} \quad (2.7)$$

Donde:

- $q$  es la variable aleatoria, en este caso magnitud de descarga.
- $F(q)$  es la probabilidad de tener una descarga con una amplitud igual o inferior que  $q$  [10].
- *Alfa*,  $\alpha$ : Es el parámetro estadístico de escala. Corresponde a la magnitud de descarga que han alcanzado el 63,2% de los pulsos (análogo al significado de media de la distribución normal). Su significado estadístico pierde valor para valores de  $\beta$  muy bajos.
- *Beta*,  $\beta$ : Es el parámetro de forma de la distribución. Es una medida de la variabilidad de las magnitudes de PDs. Un valor muy pequeño de  $\beta$  ( $\beta \ll 2$ ) se asocia a una alta variabilidad, lo que indica que habrá una gran diferencia entre la mínima y la máxima magnitud de PD detectadas en el ensayo [21], [22].

#### 2.6.1.1. Cálculo de los parámetros de Weibull

Los parámetros estadísticos de Weibull se pueden calcular realizando un ajuste por mínimos cuadrados. Partiendo de la ecuación (2.7) y aplicándole logaritmos neperianos a ambos lados, se obtiene la ecuación (2.8) [21], [22]:

$$\ln(1 - F(q)) = -\left(\frac{q}{\alpha}\right)^\beta \quad (2.8)$$

A continuación, aplicamos logaritmo decimal a la ecuación (2.8):

$$\log(-\ln(1 - F(q))) = \beta \log\left(\frac{q}{\alpha}\right) \quad (2.9)$$

De la ecuación (2.9) obtenemos una ecuación lineal de la forma:  $y = \beta x - b$ .

$$\log(-\ln((1 - F(q)))) = \beta \log(q) - \beta \log(\alpha) \quad (2.10)$$

Donde  $\beta$  es la pendiente de la recta de regresión. Los valores de  $y$ ,  $x$ ,  $b$  y  $\alpha$  que se obtienen son:

$$y = \log(-\ln((1 - F(q)))) \quad (2.11)$$

$$x = \log(q) \quad (2.12)$$

$$b = \beta \log(\alpha) \quad (2.13)$$

$$\alpha = 10^{\frac{b}{\beta}} \quad (2.14)$$

Para determinar la máxima magnitud de descargas parciales no se puede emplear el mayor valor detectado ( $Q_{\text{máx}}$ ). Por ello, se emplea la máxima amplitud estadística ( $Q_{\text{máx}95\%}$ ), que es la magnitud de PD por debajo de la cual están el 95% de todas las detectadas.

Un marcador estadístico utilizado para dar fiabilidad estadística a las medidas de magnitud es el número de descargas por ciclo, el cual está relacionado directamente con la cantidad de defectos generadores de PDs [21]:

- Número de descargas por ciclo,  $N_w$ : Representa el número medio de descargas por cada ciclo adquirido o por unidad de tiempo:

$$N_w = \frac{N}{t} \quad (2.15)$$

Donde,

$N$  es el número total de descargas parciales captadas.

$t$  es la unidad de tiempo, en nuestro caso número ciclos de adquisición (1ciclo equivale a 20ms).

### 2.6.2. Parámetros estadísticos de fase

Los parámetros estadísticos de fase están vinculados con la ubicación de los defectos, y a su vez, con el tipo de descarga. Para el cálculo de estos parámetros, normalmente se trabaja con tres distribuciones estadísticas [23]:

- La distribución  $H_{q_{\text{máx}}}(\varphi)$ , que muestra el valor máximo del pulso producido en cada ángulo de fase.
- La distribución  $H_{q_n}(\varphi)$ , que muestra el valor medio de la magnitud de los pulsos producidos en cada ángulo de fase.
- La distribución  $H_n(\varphi)$ , que muestra el número de descargas producidas en cada ángulo de fase.

Además de estas distribuciones, para la identificación automática de PDs se puede emplear la distribución estadística de amplitud  $H(q)$ , la cual muestra el número de descargas cuya magnitud es igual o menor que un determinado valor [23].

A partir de las distribuciones anteriores, se puede caracterizar la forma de los PRPDs aplicando los siguientes parámetros estadísticos:

- *Skewness (Sk, Sesgo)*: Describe la asimetría de la distribución con respecto a una normal, se define como:

$$S_k = \frac{\sum (x_i - \mu)^3 * P_i}{\sigma^3} \quad (2.16)$$

Donde,

$x_i$  es el valor de amplitud/número.

$P_i$  es la probabilidad de que aparezca dicho valor  $x_i$ .

$\mu$  es la media ( $\mu = \sum x_i * P_i$ ).

$\sigma$  es la varianza, se puede calcular de la siguiente forma:

$$\sigma^2 = \sum (x_i - \mu)^2 * P_i \quad (2.17)$$

Para una distribución normal  $Sk=0$ , si es asimétrica hacia la izquierda  $Sk>0$ , y si es asimétrica hacia la derecha  $Sk<0$ . En la siguiente figura se puede ver un ejemplo de *skewness* [23]:

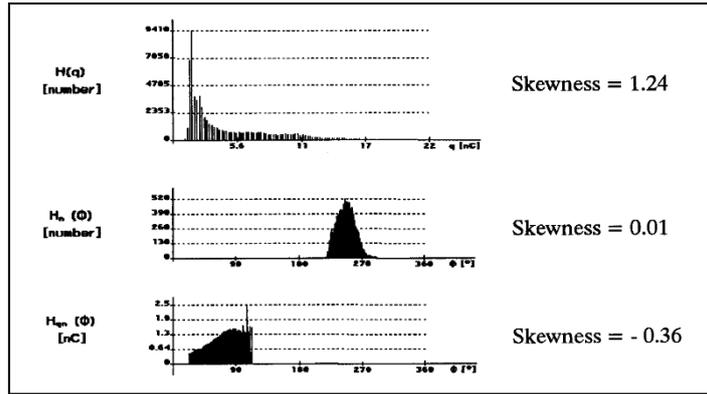


Figura 2.16. Ejemplo *Skewness* (extraído de [23])

- *Kurtosis (Ku)*: Representa lo escarpado de la distribución con respecto a una normal. Se define como:

$$Ku = \frac{\sum (x_i - \mu)^4 * P_i}{\sigma^4} - 3 \quad (2.18)$$

Si la distribución es igual de escarpada a una normal  $Ku=0$ , si es más abrupta  $Ku>0$ , y si es más llana  $Ku<0$  [23].

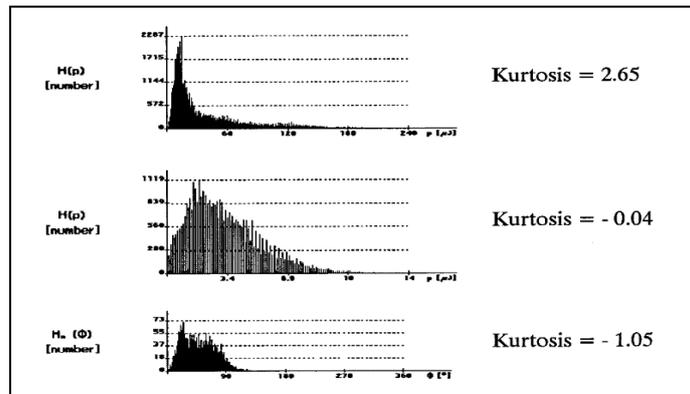


Figura 2.17. Ejemplo *Kurtosis* (extraído de [23])

- Factor de correlación cruzado (cc): Muestra la diferencia de forma entre las distribuciones del semiciclo positivo y negativo. Se define de la siguiente forma:

$$cc = \frac{\sum x_i \cdot y_i - \sum x_i \cdot \sum y_i / n}{\sqrt{\left[ \sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n} \right] \cdot \left[ \sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{n} \right]}} \quad (2.19)$$

Donde,

$x_i$  es el valor de la descarga en el semiciclo positivo.

$y_i$  es el valor de la descarga en el semiciclo negativo.

$n$  es el número de clases.

Un valor de  $cc=1$  indica que la distribución de los dos semiciclos tienen la misma forma, un valor de  $cc=0$  indica que ambas distribuciones son diferentes [23].

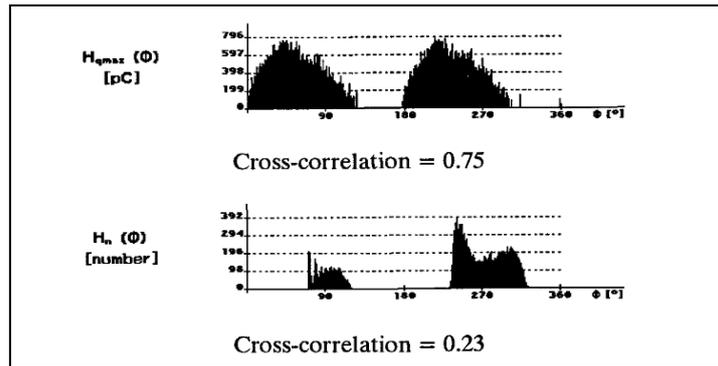


Figura 2.18. Ejemplo factor de correlación cruzado (extraído de [23])

Además de los parámetros descritos anteriormente, para la identificación de descargas parciales y según lo expuesto en [24], es necesario definir los siguientes marcadores adicionales:

- Ángulo mínimo o de inyección,  $\varphi_{\text{mín}}$  (*Angle inception,  $\varphi_i$* ): Corresponde a la fase mínima para la cual el voltaje aplicado genera descargas parciales.
- Ángulo máximo o de extinción,  $\varphi_{\text{máx}}$  (*Angle extinction,  $\varphi_e$* ): Corresponde la fase máxima para la cual la tensión aplicada genera descargas parciales.
- Intervalo de fase,  $\Delta\varphi$ : Representa el intervalo de fase (por semiciclo) en el que se producen descargas parciales debido a la tensión aplicada, se calcula de la siguiente manera:

$$\Delta\varphi = \varphi_{\text{máx}} - \varphi_{\text{mín}} \quad (2.20)$$

- Ángulo medio,  $\varphi_m$  (*Mean phase,  $\varphi_m$* ): Corresponde a la media de la distribución  $H_n(\varphi)$ , siendo el ángulo medio (por semiciclo) en que hay descargas, se calcula de esta forma:

$$\varphi_m = \frac{\sum_{i=0}^n \varphi_i}{N} \quad (2.21)$$

Donde,

$N$  es el número total de descargas parciales.

$\varphi_i$  es el ángulo en el que se produce cada descarga parcial.

Cada uno de estos parámetros se subdivide a su vez en dos, uno para el semiciclo positivo y otro para el negativo. La razón de esta división radica en que el comportamiento de las descargas parciales en un semiciclo y en otro, en principio, es distinto, lo que significa que no realizar esta distinción limitaría la información aportada por los PRPDs.

### 2.6.3. Identificación automática de descargas parciales

Desde hace unos años se ha intentado que el proceso de identificación de descargas parciales se realice de manera automática, es decir, con la menor intervención humana posible, a través del análisis de marcadores estadísticos que caractericen cada tipología de descarga parcial. En este sentido, en [23] se desarrolló un sistema de reconocimiento automático basado en redes neuronales. Esta técnica de inteligencia artificial trata de emular la capacidad de aprendizaje por repetición de las neuronas biológicas. En este caso concreto, los patrones se componían de algunos de los parámetros descritos anteriormente (*skewness*, *kurtosis*, factor de correlación cruzado, etc.), agrupados en un formato de “huella dactilar”:

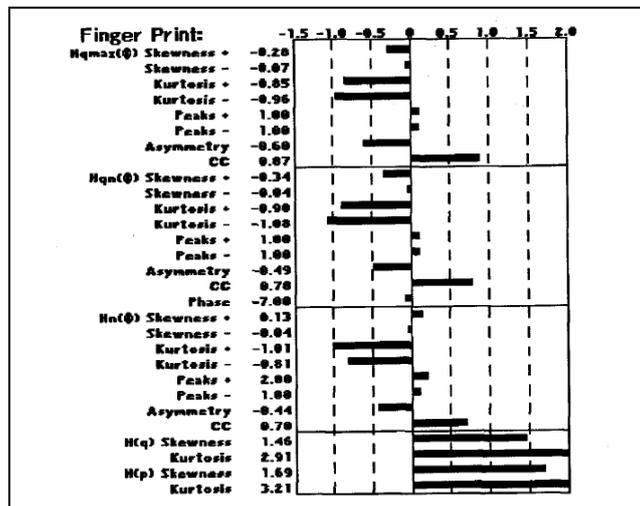


Figura 2.19. Ejemplo de “huella dactilar” (extraído de [23])

La identificación automática *off-line* de descargas parciales que se reproducirá en este trabajo se fundamenta en lo publicado en [24]. Para llevar a cabo el desarrollo de esta técnica, es necesario la utilización de parámetros estadísticos que caractericen cada tipología de descarga parcial (superficial, interna y corona) y ruido. Debido a las diferentes circunstancias en las que se realizan los ensayos, los marcadores estadísticos

que se utilicen para singularizar cada descarga parcial deberán poder emplearse con diferentes niveles de tensión, tipos de defectos, distintos objetos de ensayo, etc. Por tanto, la fuente de descargas parciales debe ser reconocida independientemente de la tensión aplicada.

Para la selección de los parámetros apropiados se debe realizar un estudio previo del comportamiento de distintos marcadores en diferentes condiciones. En la Figura 2.20 se muestra un ejemplo del comportamiento de los parámetros  $\beta$ ,  $N_w$  y  $Sk$  de la distribución  $H_n(\varphi)$  con distintos niveles de tensión aplicados [25]:

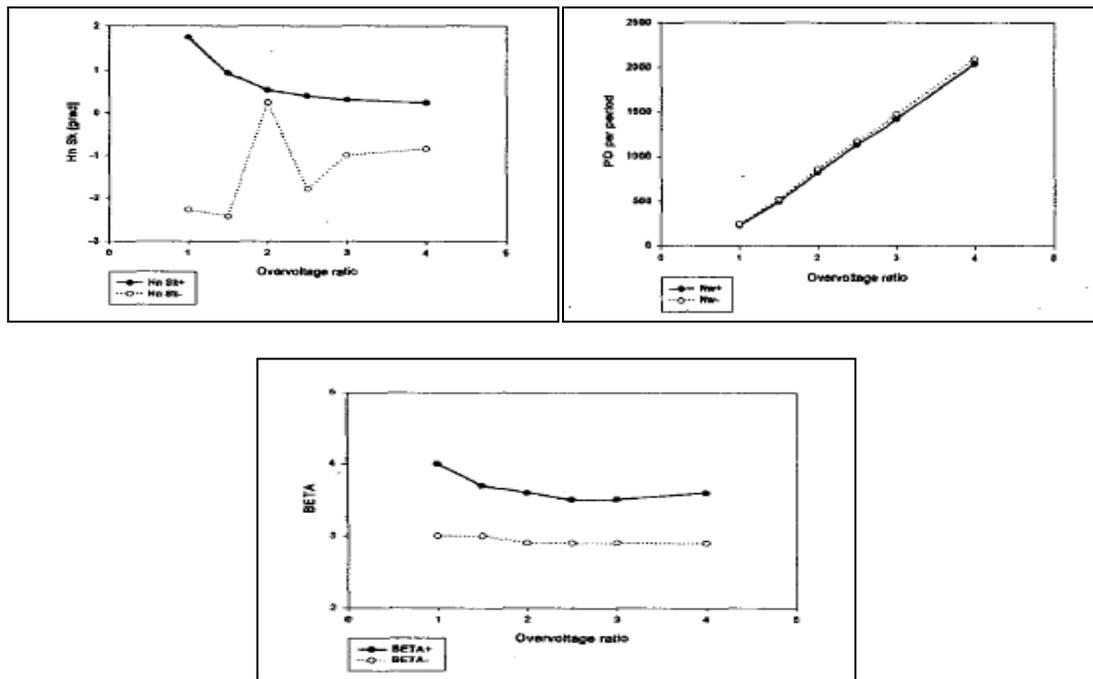


Figura 2.20. Comportamiento de una cavidad embebida en aislamiento en función de *overvoltage ratio* (tensión aplicada/tensión inception) (extraído de [25])

Las conclusiones a las que se llega a partir de la Figura 2.20 son, por un lado que  $\beta$  se mantiene prácticamente constante para cualquier tensión aplicada. Por otra parte,  $N_w$  y  $Sk$  de la distribución  $H_n(\varphi)$  varían considerablemente, por lo que no es aconsejable su utilización para el reconocimiento automático.

Al igual que  $N_w$  y  $Sk$  de la distribución  $H_n(\varphi)$ , se ha demostrado que los parámetros estadísticos de amplitud ( $\alpha$ ,  $Q_{m\acute{a}x}$ ,  $Q_{m\acute{a}x95\%}$ ) no ofrecen intervalos bien definidos capaces de identificar cada tipología de PD. Esto es consecuencia de un comportamiento muy variable ante distintos niveles de tensión aplicados.

Finalmente y tras el descarte de algunos parámetros estadísticos, para la identificación se recurrió a otros. En concreto, se utilizaron  $\beta$ ,  $\varphi_i$ ,  $\varphi_m$  y la *Skewness* de la distribución de amplitud, cuyos comportamientos se ha demostrado son los que ofrecen una mayor estabilidad para un mismo tipo de defecto [24].

Una vez elegidos los parámetros, se construyó una base de datos de los mismos para varios objetos de ensayos conocidos que generaban los tres tipos de descargas parciales mencionados anteriormente. A partir de estos parámetros, se ha comprobado cómo  $\beta$  y  $\varphi_m$  presentan intervalos bien definidos para cada tipología de PDs, por lo que se consideran los más fiables para la identificación. Con respecto a la *Skewness* de la distribución de amplitud y  $\varphi_i$  se ha observado un considerable solapamiento de alguno de los intervalos, en concreto, para descargas internas con corona y superficiales con internas respectivamente. Por lo tanto, debido a este solapamiento, los parámetros *Skewness* y  $\varphi_i$  para la identificación automática se utilizaron para descartar alguna tipología de descarga parcial en función de sus valores [24], aunque no serán determinantes para la identificación como  $\beta$  y  $\varphi_m$ . En la siguiente figura se recogen los resultados que obtuvieron en [25] para los parámetros  $\beta$ ,  $\varphi_i$ ,  $\varphi_m$  y la *Skewness* de la distribución de amplitud, en un estudio realizado para la caracterización de cada clase de descarga parcial:

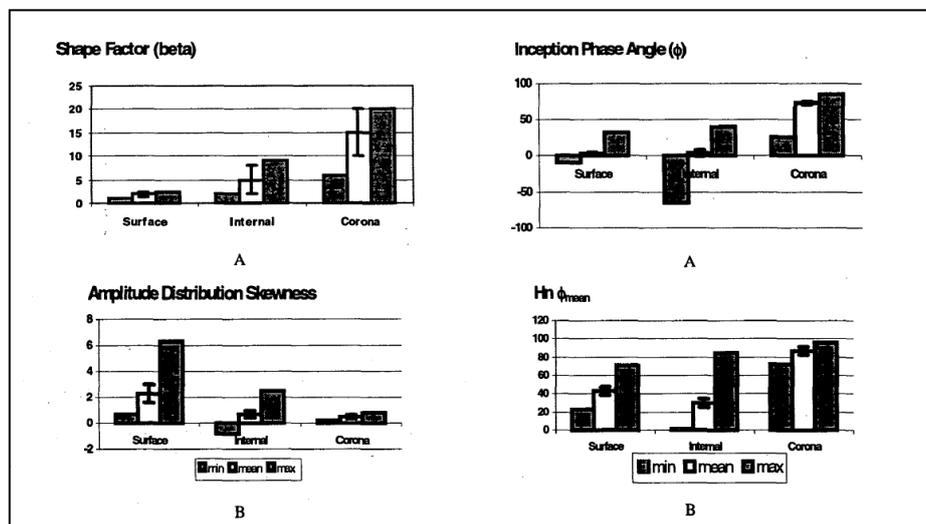


Figura 2.21. Comparación de los resultados obtenidos de los parámetros  $\beta$ ,  $\varphi_i$ ,  $\varphi_m$  y la *Skewness* de la distribución de amplitud (extraído de [25])

En este trabajo se volverán a analizar la fiabilidad de estos parámetros estadísticos para identificar fuentes de descargas parciales. Además, se estudiarán otros para complementar los previamente estudiados y se comprobarán los resultados obtenidos con objetos de ensayo preparados en el Laboratorio de Investigación y Ensayos en Alta Tensión (LINEALT) de la Universidad Carlos III de Madrid.

Por último, cabe destacar que esta aplicación, al basarse en el análisis de patrones PRPDs para realizar la identificación de las fuentes de PDs, será de vital importancia realizar un correcto filtrado de los PRPDs para que esta técnica resulte eficaz y posea un grado de fiabilidad aceptable. Por tanto, los patrones resueltos en fase deben representar descargas procedentes de un solo tipo de fuente sin ruido eléctrico

superpuesto. En la bibliografía hay múltiples trabajos que desarrollan técnicas fiables en este sentido [26], [27].

### 2.6.3.1. Identificación basada en lógica *fuzzy* (lógica difusa)

La lógica *fuzzy* tratar de modelar el razonamiento lingüístico, con el propósito de imitar la habilidad humana de tomar decisiones en un ambiente de incertidumbre e imprecisión. Estos algoritmos asocian a cada variable de entrada valores no precisos, a lo que se denomina *fuzzyfication*. A partir de estas variables de entrada y reglas predefinidas agrupadas en conjuntos (*desfuzzyfication*), se obtienen uno o varios valores de salida [24], [28]. A continuación se muestra un ejemplo de una regla heurística aplicada al reconocimiento de fuentes de descargas parciales:

**SI** ( $\beta$  es GRANDE) **AND** ( $\varphi_m$  es GRANDE) **OR** ( $\varphi_i$  es MEDIO) **OR** ( $\Delta\varphi$  es MEDIO))

**ENTONCES** (CORONA)

En [29] se implementa una aplicación basada en lógica *fuzzy* para la identificación de fuentes de PDs. Siguiendo el estudio hecho en [25] acerca del comportamiento de diferentes marcadores estadísticos, para este sistema de clasificación se utilizaron los parámetros  $\beta$ ,  $\varphi_i$ ,  $\varphi_m$  y la *Skewness* de la distribución de amplitud, pues se consideraron los más adecuados para el reconocimiento automático.

## Ensayos para la caracterización de patrones de diversas fuentes

El objeto de este capítulo es el de comparar los resultados obtenidos entre el *software* *LINEALT\_PROCESSING* y el *PD\_PROCESSING* en distintos ensayos realizados en el Laboratorio de Investigación y Ensayos en Alta Tensión (LINEALT) de la Universidad Carlos III de Madrid. Posteriormente, se formulará un sistema de clasificación de fuentes de descargas parciales a partir de los parámetros estadísticos que se consideren más fiables.

La estructura de este capítulo será la siguiente: En un primer apartado se describirán los objetos de ensayo utilizados y los resultados recogidos por cada *software*; en segundo lugar, se hará una comparación de los parámetros estadísticos obtenidos con cada programa; a continuación, se propondrán los intervalos de cada parámetro estadístico que caracterizan cada tipología de descarga parcial; por último, se diseñará el sistema de clasificación de descargas parciales.

### 3.1. ENSAYOS REALIZADOS

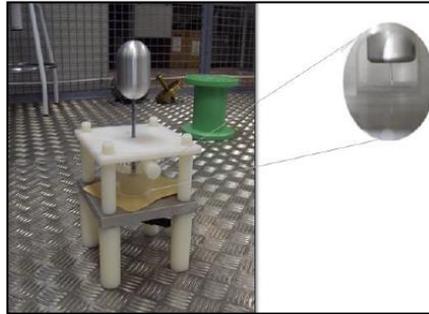
Para llevar a cabo estos ensayos se ha utilizado un circuito de detección indirecto (véase 2.4.3.1), cuyo montaje de laboratorio se puede ver en la Figura 3.1:



Figura 3.1. Montaje de laboratorio

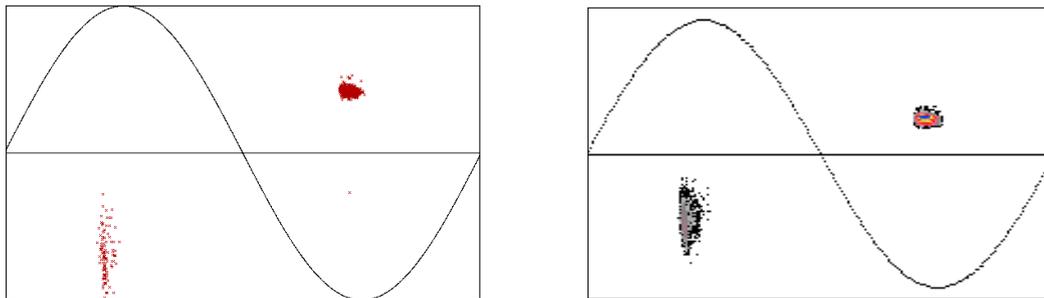
- Ensayo corona 1 (punta-plano)

Para este ensayo se ha utilizado la punta de una aguja situada perpendicularmente a una capa de papel aislante que cubre un plano metálico, simulando así una configuración del tipo punta-plano. La tensión aplicada ha sido de 2kV.



**Figura 3.2. Objeto de ensayo punta-plano**

Los PRPDs y resultados obtenidos para este ensayo con cada *software* son los siguientes:



**Figura 3.3. PRPD punta-plano LINEALT\_PROCESSING (izquierda) y PD\_PROCESSING (derecha)**

	Corona punta-plano			
	LINEALT_PROCESSING		PD_PROCESSING	
	Semiciclo Positivo	Semiciclo Negativo	Semiciclo Positivo	Semiciclo Negativo
Número descargas	110	1257	2930	31498
$Q_{m\acute{a}x}$	0,019	0,01	0,0147	0,0066
$Q_{m\acute{a}x95\%}$	0,018	0,0089	0,0117	0,0052
$\alpha$	0,0149	0,0085	0,0098	0,005
$\beta$	5,359	21,58	6,07	15,23
$\varphi_i$	70,23	73,15	70,3	71,7
$\varphi_m$	76,6	79,9	76,33	79,97
$\Delta\varphi$	16,52	18,57	25,3	22,5
Sk	-0,26	0,22	-0,2	-0,33
$N_w$	7,01		7,7	

**Tabla 3.1. Resultados ensayo punta-plano**

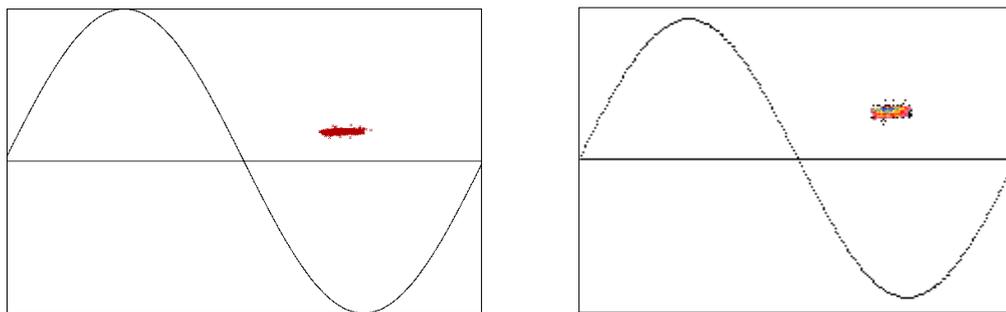
- Ensayo corona 2 (tridente)

El objeto ensayado en este caso ha sido un hilo de cobre desnudo terminado en tres puntas, es decir, con forma de tridente. La tensión aplicada ha sido de 5kV.



**Figura 3.4. Objeto de ensayo tridente**

Los PRPDs y resultados obtenidos se muestran a continuación:



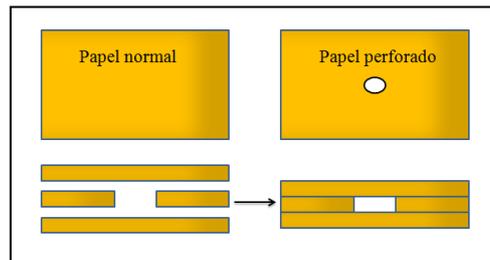
**Figura 3.5. PRPD tridente LINEALT\_PROCESSING (izquierda) y PD\_PROCESSING (derecha)**

	Corona tridente			
	LINEALT_PROCESSING		PD_PROCESSING	
	Semiciclo Positivo	Semiciclo Negativo	Semiciclo Positivo	Semiciclo Negativo
Número descargas	-	1171	-	2060
$Q_{m\acute{a}x}$	-	0,018	-	0,0077
$Q_{m\acute{a}x95\%}$	-	0,01	-	0,006
$\alpha$	-	0,0098	-	0,0064
$\beta$	-	22,86	-	17,57
$\varphi_i$	-	57,24	-	59,1
$\varphi_m$	-	73,53	-	74,69
$\Delta\varphi$	-	38,14	-	33,8
Sk	-	-0,37	-	-0,39
$N_w$	10,09		10,1	

**Tabla 3.2. Resultados ensayo tridente**

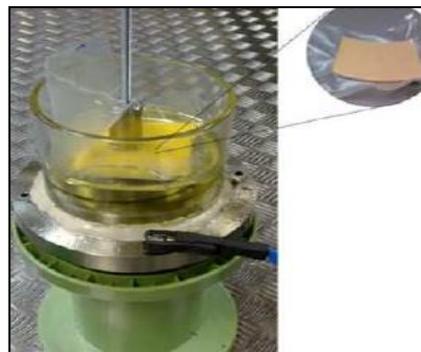
- Ensayo Internas 1

La configuración utilizada para conseguir descargas parciales internas ha sido la de papel aislante con un hueco en su interior. El sistema estaba compuesto de tres capas de 0.35mm de espesor apiladas y envasadas al vacío. Una de las capas, la central, estaba perforada para simular una vacuola. El conjunto se envasó al vacío y se sumergió en aceite mineral para evitar descargas parciales superficiales. Un esquema de la colocación del papel se puede ver en la siguiente figura:



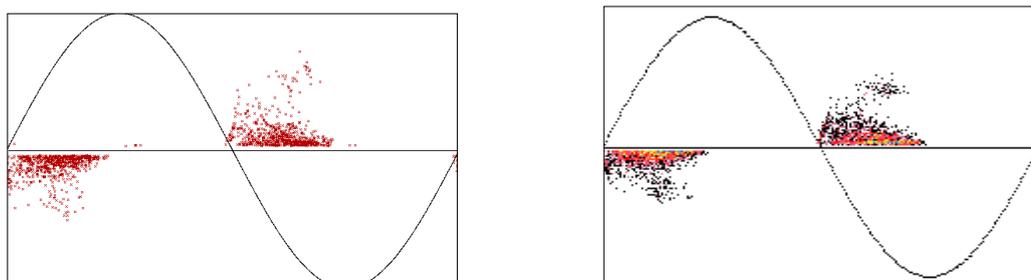
**Figura 3.6. Colocación papel perforado**

La tensión aplicada ha sido de 14kV. El objeto de ensayo utilizado se muestra a continuación:



**Figura 3.7. Objeto de ensayo Internas 1**

Los resultados obtenidos para este ensayo y sus PRPDs con cada *software* son los siguientes:



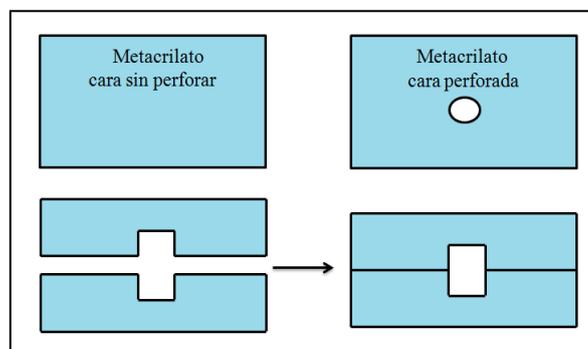
**Figura 3.8. PRPD Internas 1 LINEALT\_PROCESSING (izquierda) y PD\_PROCESSING (derecha)**

	Internas 1			
	LINEALT_PROCESSING		PD_PROCESSING	
	Semiciclo Positivo	Semiciclo Negativo	Semiciclo Positivo	Semiciclo Negativo
Número descargas	676	584	1961	1954
$Q_{m\acute{a}x}$	0,05	0,071	0,038	0,051
$Q_{m\acute{a}x95\%}$	0,029	0,0456	0,021	0,029
$\alpha$	0,0115	0,119	0,0082	0,0103
$\beta$	1,36	1,23	1,36	1,3
$\varphi_i$	-4,42	-4,79	-2,8	-4,2
$\varphi_m$	38	37,369	41,04	41,08
$\Delta\varphi$	84,81	84	91,4	91,4
Sk	2,06	2,34	2,29	2,47
$N_w$	38,65		38,73	

**Tabla 3.3. Resultados ensayo Internas 1**

- Ensayo internas 2

En este ensayo se ha utilizado una configuración similar a la del ensayo de *Internas 1*, con la diferencia de que en este caso se ha empleado metacrilato en lugar de papel aislante. El sistema estaba compuesto de dos láminas de metacrilato de 3mm de espesor apiladas y envasadas al vacío. En esta prueba, con el propósito de simular una vacuola, la parte interior de cada lámina estaba perforada mediante un taladro, con un orificio de 4mm de diámetro y 1,5mm de profundidad. Por tanto, una vacuola de 2\*1,5mm de generatriz queda al enfrentar ambas piezas de metacrilato. Al igual que en el anterior objeto de ensayo, el conjunto se sumergió en aceite mineral para evitar la aparición de descargas parciales superficiales a baja tensión. A continuación se muestra un esquema de la colocación del metacrilato:



**Figura 3.9. Colocación metacrilato perforado**

La tensión aplicada ha sido de 11kV. El objeto de ensayo se muestra en la Figura 3.10:



Figura 3.10. Objeto de ensayo de Internas 2

Los resultados obtenidos con cada *software* y sus respectivos PRPDs son los siguientes:

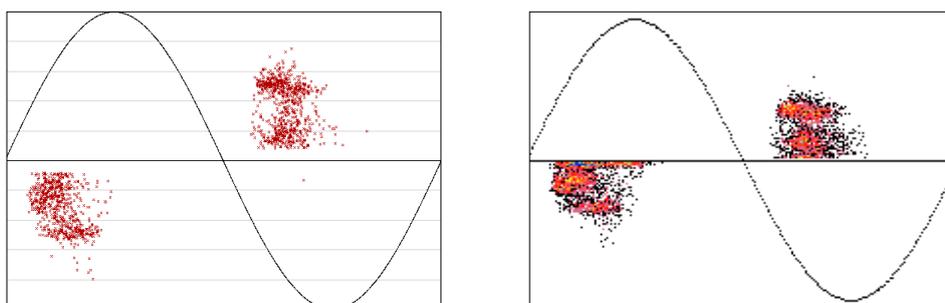


Figura 3.11. PRPD Internas 2 LINEALT\_PROCESSING (izquierda) y PD\_PROCESSING (derecha)

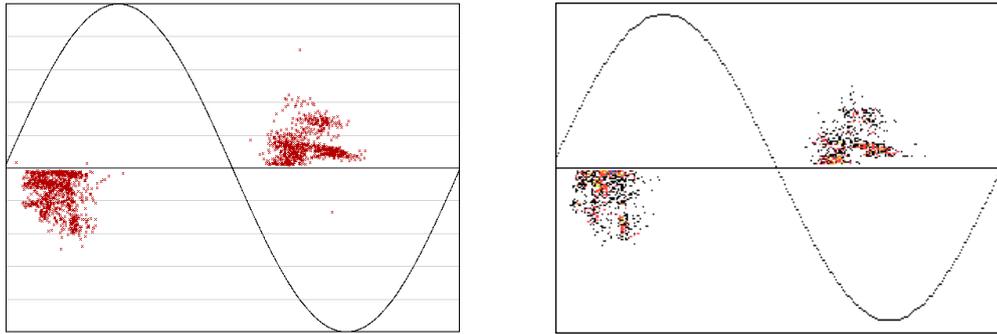
	Internas 2			
	LINEALT_PROCESSING		PD_PROCESSING	
	Semiciclo Positivo	Semiciclo Negativo	Semiciclo Positivo	Semiciclo Negativo
Número descargas	679	755	3250	2722
$Q_{m\acute{a}x}$	0,39	0,37	0,277	0,269
$Q_{m\acute{a}x95\%}$	0,25	0,28	0,156	0,179
$\alpha$	0,18	0,2	0,0709	0,119
$\beta$	2,27	2,21	1,16	1,87
$\varphi_i$	18,6	23,26	19,7	22,5
$\varphi_m$	46,24	50,87	50,67	52,79
$\Delta\varphi$	68,89	95,01	94,2	80,2
Sk	0,22	-0,2	0,59	-0,1
$N_w$	2,26		1,06	

Tabla 3.4. Resultados ensayo Internas 2

- Ensayo internas 3

La configuración, el sistema y el objeto de ensayo utilizado en esta prueba han sido idénticos a los utilizados para el ensayo anterior (*Internas 2*). La diferencia entre los dos ensayos radica en la tensión aplicada, que en este caso se aumentó hasta 13kV.

Los PRPDs y resultados obtenidos se muestran a continuación:



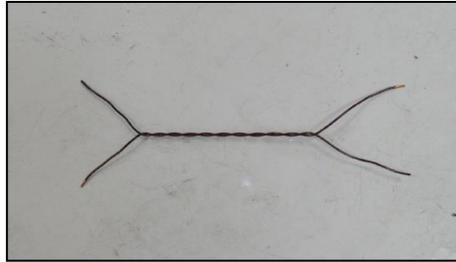
**Figura 3.12. PRPD Internas 3 LINEALT\_PROCESSING (izquierda) y PD\_PROCESSING (derecha)**

	Internas 3			
	LINEALT_PROCESSING		PD_PROCESSING	
	Semiciclo Positivo	Semiciclo Negativo	Semiciclo Positivo	Semiciclo Negativo
Número descargas	1007	803	934	765
$Q_{m\acute{a}x}$	0,24	0,36	0,135	0,143
$Q_{m\acute{a}x95\%}$	0,178	0,155	0,106	0,09
$\alpha$	0,079	0,077	0,046	0,048
$\beta$	1,29	1,56	1,28	1,64
$\varphi_i$	9,35	14,24	15,5	22,5
$\varphi_m$	41,42	59,86	44,4	60,71
$\Delta\varphi$	84,06	90,9	71,7	95,6
Sk	0,78	1,03	0,79	1,03
$N_w$	2,67		3,18	

**Tabla 3.5. Resultados ensayo Internas 3**

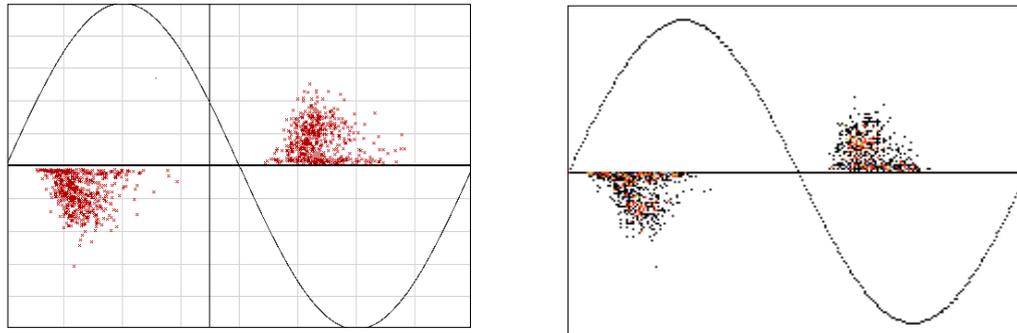
- Ensayo superficiales 1 (par trenzado)

El objeto de ensayo utilizado en este caso ha sido un par trenzado de hilo magnético, para simular las descargas superficiales que se producen en los aislamientos entre espiras en máquinas eléctricas.



**Figura 3.13. Objeto de ensayo par trenzado**

Para una tensión aplicada de 0,7kV, los resultados obtenidos y PRPDs son los mostrados a continuación:



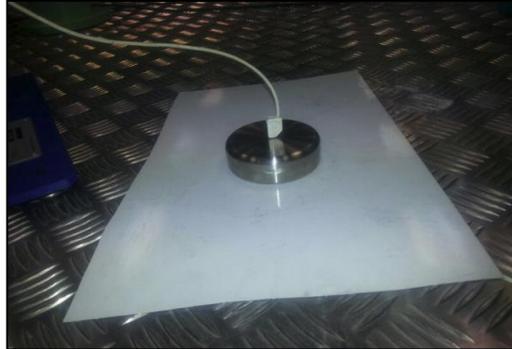
**Figura 3.14. PRPD par trenzado LINEALT\_PROCESSING (izquierda) y PD\_PROCESSING (derecha)**

	Superficiales 1			
	LINEALT_PROCESSING		PD_PROCESSING	
	Semiciclo Positivo	Semiciclo Negativo	Semiciclo Positivo	Semiciclo Negativo
Número descargas	627	581	758	703
$Q_{\text{máx}}$	6,13	5,06	2,812	2,26
$Q_{\text{máx}95\%}$	3,32	3,43	1,48	1,429
$\alpha$	1,708	1,739	0,498	0,67
$\beta$	1,38	1,34	0,88	1,29
$\varphi_i$	21,61	20,169	14,1	23,9
$\varphi_m$	57,1	59,648	54,59	56,04
$\Delta\varphi$	110,02	94,33	98,4	80,2
Sk	0,6	0,5	0,86	0,6
$N_w$	4,26		7,32	

**Tabla 3.6. Resultados ensayo par trenzado**

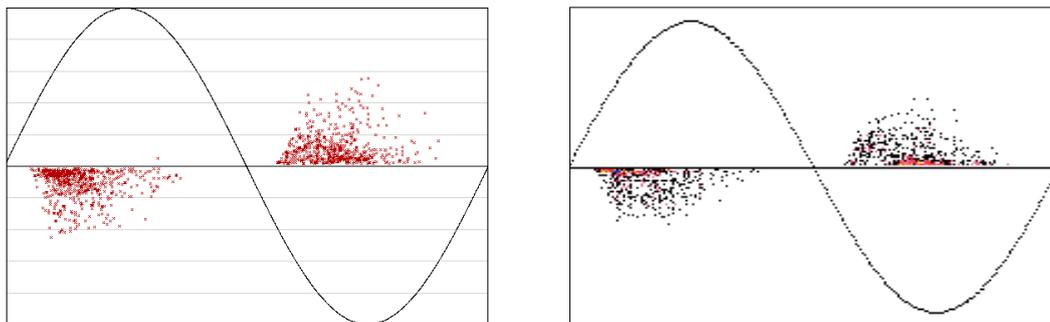
- Ensayo superficiales 2 (lámina polietileno)

En este ensayo se ha colocado un electrodo encima de una lámina de polietileno. La tensión aplicada ha sido de 1,4kV.



**Figura 3.15. Objeto de ensayo lámina**

Los resultados obtenidos y PRPDs son los siguientes:



**Figura 3.16. PRPD lámina LINEALT\_PROCESSING (izquierda) y PD\_PROCESSING (derecha)**

	Superficiales 2			
	LINEALT_PROCESSING		PD_PROCESSING	
	Semiciclo Positivo	Semiciclo Negativo	Semiciclo Positivo	Semiciclo Negativo
Número descargas	605	556	715	645
$Q_{m\acute{a}x}$	2,24	2,77	1,75	2,14
$Q_{m\acute{a}x95\%}$	1,59	1,69	1,08	1,17
$\alpha$	0,576	0,612	0,388	0,488
$\beta$	1,19	1,21	1,09	1,28
$\varphi_i$	20,13	23,01	19,7	22,5
$\varphi_m$	55,12	65,8	52,64	70,58
$\Delta\varphi$	110,86	119,59	120,9	119,5
Sk	1,43	1,65	1,34	1,47
$N_w$	5,63		4,54	

**Tabla 3.7. Resultados ensayo lámina**

- Caracterización de ruido

Se ha realizado una adquisición de ruido con *LINEALT\_PROCESSING* y *PD\_PROCESSING* para poder caracterizarlo y distinguirlo de las fuentes caracterizadas de descargas parciales; los resultados se muestran a continuación:

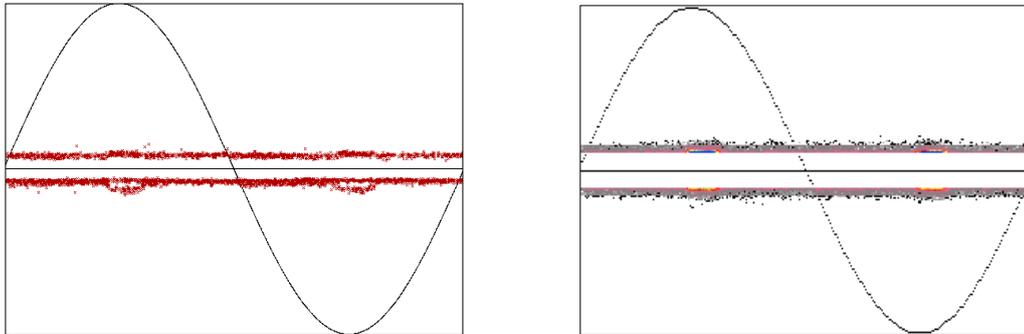


Figura 3.17. PRPD Ruido *LINEALT\_PROCESSING* (izquierda) y *PD\_PROCESSING* (derecha)

	Ruido			
	<i>LINEALT_PROCESSING</i>		<i>PD_PROCESSING</i>	
	Semiciclo Positivo	Semiciclo Negativo	Semiciclo Positivo	Semiciclo Negativo
Número descargas	950	608	20980	18240
$Q_{m\acute{a}x}$	0,003	0,0023	0,002	0,0019
$Q_{m\acute{a}x95\%}$	0,0023	0,0019	0,0013	0,0013
$\alpha$	0,0017	0,0017	0,0012	0,0012
$\beta$	4,15	8,62	7,7	7,72
$\varphi_i$	0,006	-2,23	-5,6	-5,6
$\varphi_m$	89,01	78,91	94,68	88,61
$\Delta\varphi$	182,56	182	191,2	191,2
Sk	1,9	-0,13	1,52	1,39
$N_w$	519,33		107,01	

Tabla 3.8. Resultados Ruido

### 3.2. COMPARACIÓN ENTRE SISTEMAS DE ADQUISICIÓN

En cuanto a los parámetros  $\alpha$ ,  $Q_{\text{máx}}$  y  $Q_{\text{máx}95\%}$ , las diferencias que encontramos en los resultados de los dos *software* son debidas a posibles cambios en el acondicionamiento de la señal en los canales y en la frecuencia de muestreo (las frecuencias de muestreo de *PD\_PROCESSING* y *LINEALT\_PROCESSING* son 100 y 200 MHz respectivamente, lo que influye en la adquisición de cada pulso de descarga y por tanto en la determinación de la magnitud de la descarga parcial). En todo caso, tal y como se explicó en el capítulo anterior (véase 2.6.3), estos parámetros estadísticos de amplitud son menos relevantes para identificar fuentes de descarga, ya que dependen de otros factores adicionales, como la tensión aplicada.

Como se puede ver también hay una cierta diferencia entre los parámetros estadísticos  $\varphi_i$  y  $\Delta\varphi$  obtenidos con los dos *software*. Esto se debe a la diferencia en el número de descargas adquiridas por cada *software*, ya que estos parámetros son muy sensibles a diferencias en el número de eventos medidos (lo que depende, a su vez, de la velocidad del sistema de adquisición y de los niveles de *trigger* elegidos). Como se puede apreciar, este cambio es menos importante para los experimentos de descargas corona, donde el fenómeno físico es menos disperso por definición.

Las diferencias en los niveles de *trigger* elegidos (muy difíciles de igualar en ambos *software*, por las diferencias en las magnitudes detectadas antes mencionadas), además, afectan incluso a los valores de  $N_w$  y  $\beta$ .

Por otro lado podemos ver cómo si comparamos los valores obtenidos con los dos *software* de  $\varphi_m$  y *Skewness*, las diferencias entre uno y otro son mucho menores que las obtenidas para los parámetros  $\varphi_i$  y  $\Delta\varphi$ . Esto se debe a que  $\varphi_m$  y *Skewness* se ven menos afectadas por el número de descargas captadas y su magnitud, ya que son parámetros con una mayor fiabilidad estadística.

### 3.3. COMPARACIÓN ENTRE DIFERENTES FUENTES DE EMISIÓN DE PULSOS

Uno de los parámetros utilizados en la identificación automática de fuentes de emisión de PDs es la *skewness* de la distribución de amplitud  $H(q)$  (véase 2.6.2 y 2.6.3). A continuación, y debido a que no se detalla en la bibliografía citada, se procederá a especificar su cálculo:

- *Skewness* de  $H(q)$  ( $S_k$ , *Sesgo*): Describe la asimetría de la distribución de amplitud con respecto a una normal, se define como:

$$S_k = \frac{\sum (y_i - \mu)^3 * P_i}{\sigma^3} \quad (3.1)$$

Donde,

$y_i$  corresponde a cada valor de amplitud.

$P_i$  es la probabilidad de que aparezca dicho valor  $y_i$ .

$\mu$  es la media ( $\mu = \sum y_i * P_i$ ).

$\sigma$  es la varianza, se puede calcular de la siguiente forma:

$$\sigma^2 = \sum (y_i - \mu)^2 * P_i \quad (3.2)$$

Para una distribución normal  $S_k=0$ , si es asimétrica hacia la izquierda  $S_k>0$ , y si es asimétrica hacia la derecha  $S_k<0$ . En la siguiente figura se puede ver un ejemplo obtenido con el *software LINEALT\_PROCESSING*:

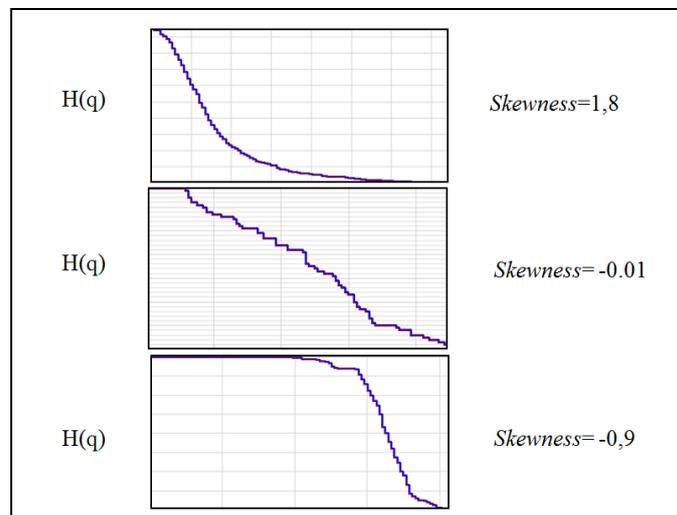


Figura 3.18. Ejemplo *skewness* de la distribución de amplitud

### 3.3.1. Propuesta valores umbrales

En este apartado se va a realizar una primera propuesta de los valores umbrales de cada parámetro para realizar la identificación automática de cada tipo de descarga. Para ello, se emplearán los resultados obtenidos con el *software LINEALT\_PROCESSING* en los anteriores ensayos, utilizando los parámetros  $\beta$ ,  $\varphi_i$ ,  $\varphi_m$  y *Skewness*, pues fueron la referencia de anteriores trabajos (véase 2.6.3).

Para determinar los intervalos característicos de cada tipo de descarga parcial se ha recogido en los siguientes gráficos los resultados de los ensayos realizados:

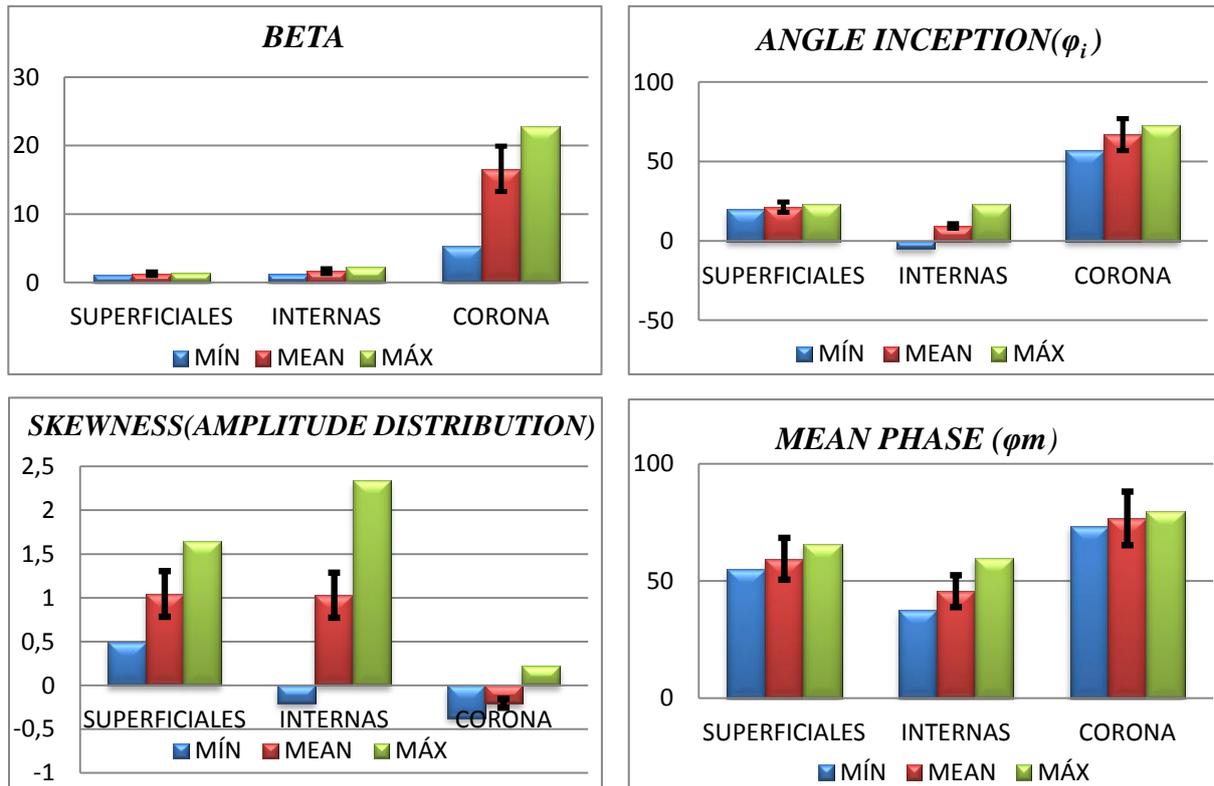


Figura 3.19. Gráficas resultados obtenidos

A partir de estos gráficos y las adquisiciones que se han hecho de ruido se proponen los siguientes intervalos para cada tipología de descarga parcial y ruido:

VALORES UMBRALES I				
	$\beta$	$\varphi_i$ ( $^\circ$ )	$\varphi_m$ ( $^\circ$ )	<i>Skewness</i>
SUPERFICIALES	$1 < \beta < 2$	$10 < \varphi_i < 35$	$50 < \varphi_m < 70$	$0,5 < Sk < 1,65$
INTERNAS	$1 < \beta < 2,3$	$-15 < \varphi_i < 25$	$30 < \varphi_m < 60$	$-0,2 < Sk < 2,5$
CORONA	$5 < \beta < 25$	$50 < \varphi_i < 75$	$70 < \varphi_m < 85$	$-0,5 < Sk < 0,25$
RUIDO	$3 < \beta < 9$	$-10 < \varphi_i < 10$	$75 < \varphi_m < 90$	$-0,5 < Sk < 2$

Tabla 3.9. Valores umbrales I

De la observación de la tabla anterior, es claro que  $\beta$  tiene una influencia muy clara en la identificación. Igualmente,  $\varphi_i$  y  $\varphi_m$  permiten otorgar cierta pertenencia a las clases internas y superficiales (son más grandes para éstas últimas), aunque no de forma determinista. Por el contrario, la *skewness* no permite diferenciar entre tipos de fuentes y será descartado como indicador.

Por otro lado, el ruido eléctrico parece difícil de distinguir empleando estos parámetros. Por ello, se analiza otro dato que no se había estudiado en la bibliografía:  $\Delta\varphi$ .

VALORES UMBRALES II	
	$\Delta\varphi$ (°)
SUPERFICIALES	$95 < \Delta\varphi < 120$
INTERNAS	$65 < \Delta\varphi < 95$
CORONA	$16 < \Delta\varphi < 40$
RUIDO	$180 < \Delta\varphi < 190$

**Tabla 3.10. Valores umbrales II**

Comparando los valores umbrales de la Tabla 3.10, se aprecia cómo el intervalo de  $\Delta\varphi$  para ruido está claramente diferenciado de los otros tipos de descargas parciales. Por ello, se considera fiable la utilización de este parámetro para la identificación de ruido. Además de este parámetro, se usará una señal *booleana* emitida por el programa cuando suceda que, para todas las descargas, la separación de fases entre descargas consecutivas sea menor que un valor establecido (en nuestro caso y a partir de la comparación del patrón PRPD característico de ruido [véase Figura 3.17] con los patrones PRPDs típicos de las tres clases de descargas parciales, se ha considerado 0,001s).

### 3.3.2. Primera propuesta de algoritmo de clasificación de patrones resueltos en fase

El algoritmo que se va desarrollar, dotará al *software LINEALT\_PROCESSING* de un sistema de identificación automática de fuentes de descargas parciales, el cual será capaz de diferenciar entre los tres tipos básicos de descargas parciales (internas, superficiales o corona) y ruido.

Para llevar a cabo la identificación, el algoritmo empleará los parámetros estadísticos  $\beta$ ,  $\varphi_i$ ,  $\varphi_m$  y  $\Delta\varphi$ . Como resultado del estudio realizado en este capítulo, para caracterizar cada tipología de descarga parcial se utilizarán los valores umbrales (véase Tabla 3.9 y 3.10) establecidos en el apartado anterior.

En la siguiente figura se muestra el núcleo principal del árbol de decisión:

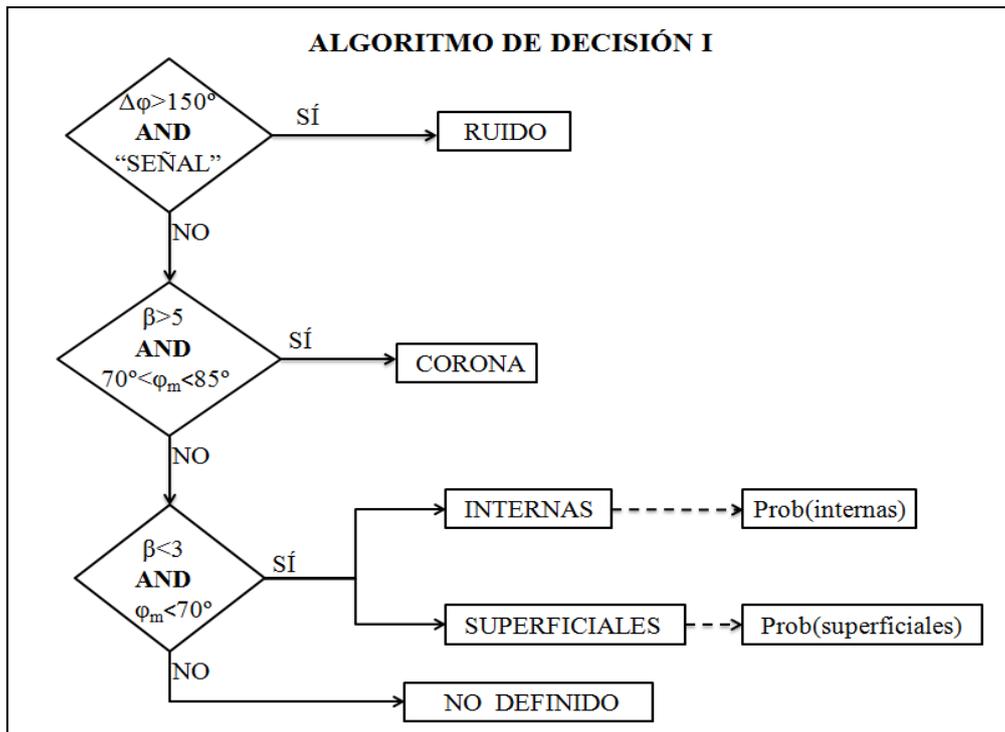


Figura 3.20. Árbol de decisión I

En el caso de que el sistema decida que los pulsos analizados corresponden a descargas parciales del tipo internas o superficiales, el programa mostrará la probabilidad de que la fuente analizada sea de un tipo u otro. El cálculo de esta probabilidad se realiza en base a los parámetros  $\varphi_i$  y  $\varphi_m$ , tal y como se detalla a continuación:

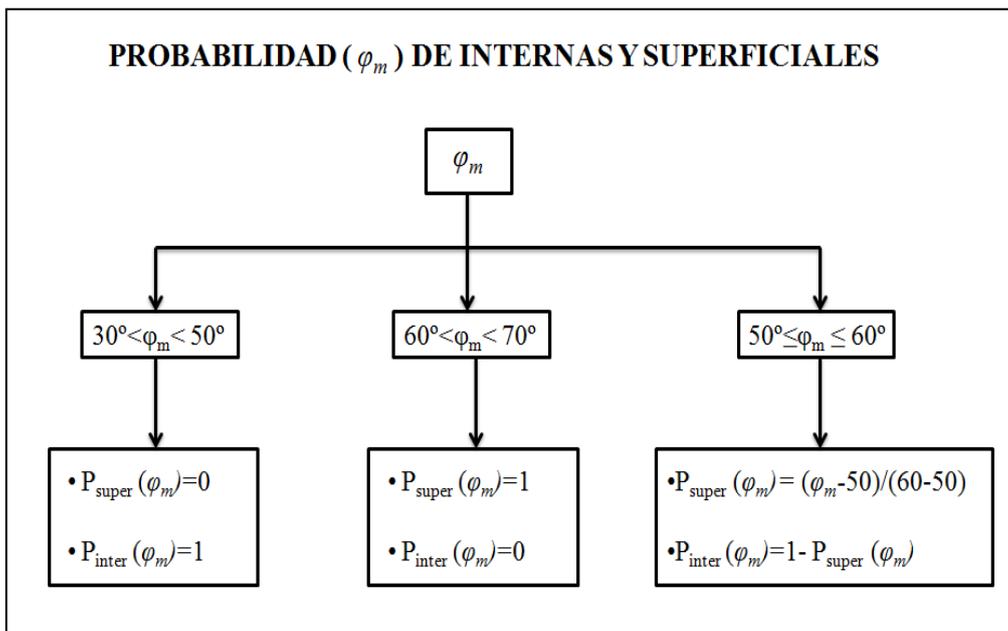
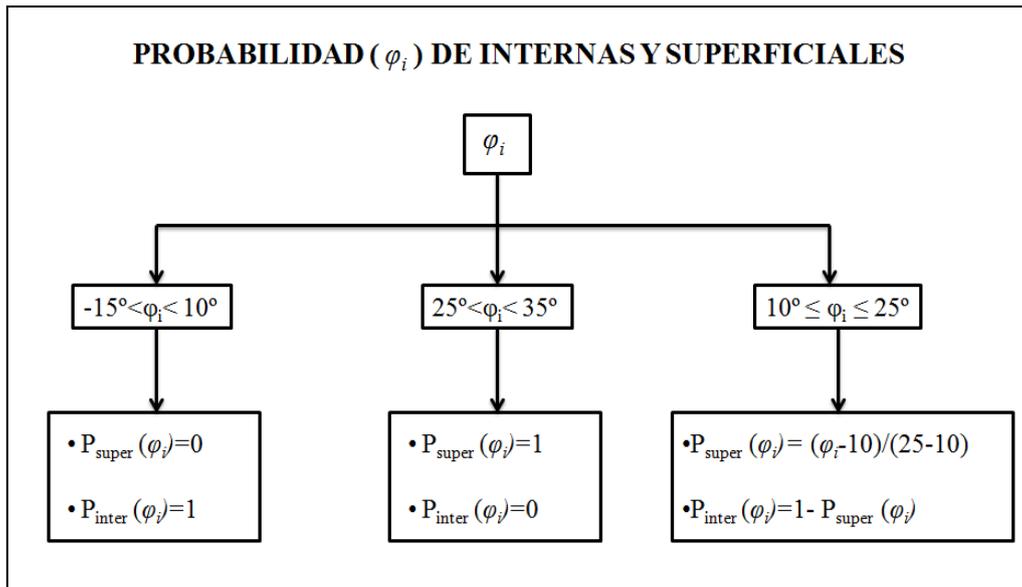


Figura 3.21. Cálculo probabilidad de internas y superficiales ( $\varphi_m$ )



**Figura 3.22. Cálculo probabilidad de internas y superficiales ( $\varphi_i$ )**

La probabilidad final, tanto de internas como de superficiales, se calcula como combinación de de las probabilidades obtenidas con  $\varphi_i$  y  $\varphi_m$ . La probabilidad resultante quedaría de la siguiente manera:

$$P_{super} = [P_{super}(\varphi_i) + P_{super}(\varphi_m)] * 100 \quad (3.3)$$

$$P_{inter} = [P_{inter}(\varphi_i) + P_{inter}(\varphi_m)] * 100 \quad (3.4)$$

Para que la suma de ambas probabilidades resulte igual a 100%, es decir, sean complementarias, se asignará un peso a cada probabilidad en función de la probabilidad total que se haya obtenido. El procedimiento sería el siguiente:

$$P_{total} = P_{super} + P_{inter} \quad (3.5)$$

$$P'_{super} = \frac{P_{super} * 100}{P_{total}} \quad (3.6)$$

$$P'_{inter} = \frac{P_{inter} * 100}{P_{total}} \quad (3.7)$$

Como ya se ha explicado (véase 2.6.2), cada parámetro estadístico se subdivide a su vez en dos, uno para el semiciclo positivo y otro para el negativo. En nuestro caso, se supondrá que las descargas del tipo superficiales e internas son simétricas, es decir, que los PRPDs del semiciclo positivo y negativo coinciden. De esta forma, el *software* utilizará como referencia el promedio de los parámetros estadísticos de cada semiciclo.

En el caso de descargas corona, debido a la singularidad de sus patrones y a la gran diferencia que existe en la forma de los PRPDs del semiciclo positivo y del negativo (véase 2.5.3), no es posible hacer la suposición realizada para las descargas internas y superficiales. Por estas razones y debido a que es el PRPD del semiciclo negativo el que realmente caracteriza las descargas corona (siempre está presente para el circuito indirecto [3]), el sistema utilizará como referencia los marcadores estadísticos correspondientes a éste.

### 3.3.3. Segunda propuesta de algoritmo de clasificación de patrones resueltos en fase

En este apartado se propondrá un segundo algoritmo de identificación de descargas parciales con las mismas prestaciones que ofrecía el desarrollado en el apartado anterior, es decir, con la capacidad de diferenciar las tres fuentes de descargas parciales y ruido.

Al igual que el algoritmo antecesor, el nuevo empleará para la identificación de ruido el mismo sistema que el descrito para el primero. Sin embargo, para el reconocimiento de las tres clases de descargas parciales se empleará, por un lado el parámetro  $\beta$  estudiado a lo largo de este capítulo, y por otro, se utilizará el ángulo de inyección medio o el ángulo de extinción medio. Debido a lo novedoso de estos últimos marcadores y a que no se encuentran en la bibliografía citada, a continuación se detallan:

- Ángulo de inyección medio,  $\varphi_{im}$  (*Angle inception mean,  $\varphi_{im}$* ): Corresponde al promedio de los ángulos de inyección pertenecientes a cada ciclo de adquisición. Se calcula de la siguiente forma:

$$\varphi_{im} = \frac{\sum_{j=0}^n (\varphi_i)_j}{n} \quad (3.8)$$

Donde,

$\varphi_i$  es el ángulo de inyección de cada ciclo de adquisición.

$n$  es el número total de ciclos de adquisición.

- Ángulo de extinción medio,  $\varphi_{em}$  (*Angle extinction mean,  $\varphi_{em}$* ): Corresponde al promedio de los ángulos de extinción pertenecientes a cada ciclo de adquisición. Se calcula de la siguiente forma:

$$\varphi_{em} = \frac{\sum_{j=0}^n (\varphi_e)_j}{n} \quad (3.9)$$

Donde,

$\varphi_e$  es el ángulo de extinción de cada ciclo de adquisición.

n es el número total de ciclos de adquisición.

Al no haberse encontrado otro *software* que calculase estos parámetros, en este caso no se han podido comparar los resultados con ningún otro programa. Por ello, en la siguiente tabla se recogen los valores de  $\varphi_{im}$  y  $\varphi_{em}$  obtenidos, con el sistema *LINEALT\_PROCESSING*, para los ensayos realizados en este capítulo:

ANGLE_INCEPTION_MEAN (°)			
LINEALT_PROCESSING			
ENSAYO	Semiciclo positivo	Semiciclo negativo	Promedio
Corona punta plano	75,76	75,65	75,7
Corona tridente	0	62,23	-
Internas 1	3,4	0,37	1,88
Internas 2	43,61	47,68	45,64
Internas 3	35,55	55,3	45,4
Superficiales par trenzado	46,43	50,11	48,27
Superficiales lámina	40,46	46,66	43,56

ANGLE_EXTINCTION_MEAN (°)			
LINEALT_PROCESSING			
ENSAYO	Semiciclo positivo	Semiciclo negativo	Promedio
Corona punta plano	76,84	85,15	80,99
Corona tridente	0	86	-
Internas 1	72,94	74,1	73,52
Internas 2	49,75	52,97	51,36
Internas 3	46,7	65,39	56,04
Superficiales par trenzado	65,86	69,81	67,83
Superficiales lámina	72,76	82,66	77,71

**Tabla 3.11. Valores de  $\varphi_{im}$  (arriba) y de  $\varphi_{em}$  (abajo)**

Por las mismas razones que las explicadas para el primer algoritmo (véase 3.3.2), se tomará como referencia para descargas corona los parámetros del semiciclo negativo y se hará un promedio de ambos semiciclos para las descargas internas y superficiales.

Estos son los motivos por los que se ha añadido en la tabla anterior la columna “promedio”, de esta forma comparando los resultados obtenidos con los dos parámetros en dicha columna, se aprecia cómo el intervalo de solapamiento entre descargas internas y superficiales para  $\varphi_{em}$  es algo mayor que su homólogo con  $\varphi_{im}$ . Como se puede observar en la Tabla 3.11, dicho intervalo en el caso del marcador  $\varphi_{em}$ , quedaría definido entre  $67^\circ$  a  $73^\circ$ , por otro lado, para  $\varphi_{im}$  este lapso se encuentra entre  $43^\circ$  y  $46^\circ$ . Al ser, aproximadamente, el doble de amplio el intervalo de solapamiento para  $\varphi_{em}$ , se considera más apropiado para la identificación el marcador ángulo de inyección medio y por tanto, será el que se utilice para este nuevo algoritmo de clasificación.

En relación al ángulo de inyección medio, por su propia definición y por cómo está calculado,  $\varphi_{im}$  posee una fiabilidad estadística mucho mayor que  $\varphi_i$ . Además, de la Tabla 3.11 se aprecia cómo, utilizando  $\beta$  y  $\varphi_{im}$ , se puede realizar la distinción de las tres clases de descargas parciales sin necesidad de otros parámetros estadísticos. La utilización de únicamente dos marcadores se traduce en una menor incertidumbre estadística y facilita el cálculo de la de la probabilidad asociada a cada tipo de descarga.

Como paso previo al diseño del algoritmo, en la siguiente tabla se van a presentar los valores umbrales de  $\varphi_{im}$  definidos para cada tipología de descarga parcial:

VALORES UMBRALES III	
	$\varphi_{im} (^\circ)$
SUPERFICIALES	$43 \leq \varphi_{im} < 55$
INTERNAS	$-5 \leq \varphi_{im} < 46$
CORONA	$60 \leq \varphi_{im} < 90$

**Tabla 3.12. Valores umbrales III**

Tal y como se puede observar en la Tabla 3.12, con  $\varphi_{im}$  quedan bien diferenciadas las descargas corona de internas y superficiales. Lo que además sucede es un solapamiento de los intervalos de internas y superficiales en torno a  $45^\circ$ , lo que se tratará con un árbol probabilístico de la misma forma que se hizo en el primer algoritmo para  $\varphi_i$  y  $\varphi_m$ . En cualquier caso, la incertidumbre estadística es inferior en este caso, pues solamente aparece una variable y la superposición detectada se produce en las decenas de grado.

Finalmente, el núcleo de decisión del nuevo sistema de identificación, el cual empleará los parámetros  $\beta$ ,  $\Delta\varphi$  y  $\varphi_{im}$ , queda de la siguiente manera:

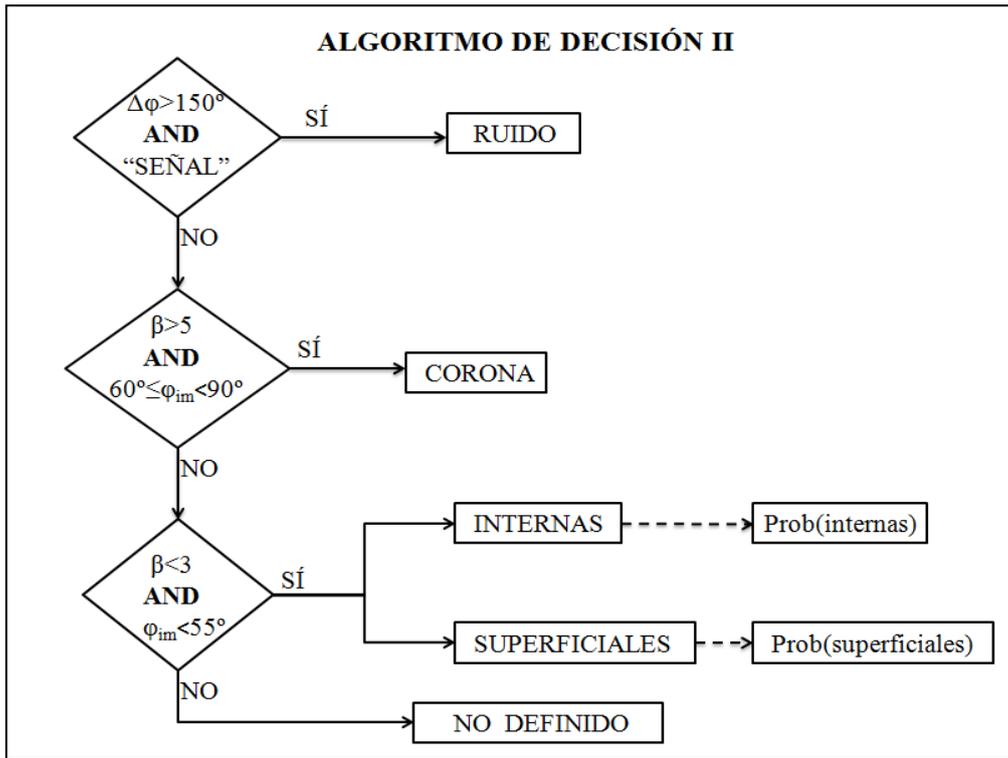


Figura 3.23. Árbol de decisión II

De la misma forma que ocurría en el primer sistema de identificación, cuando el algoritmo determina que los pulsos analizados son descargas internas o superficiales, el programa calcula la probabilidad de ambas opciones:

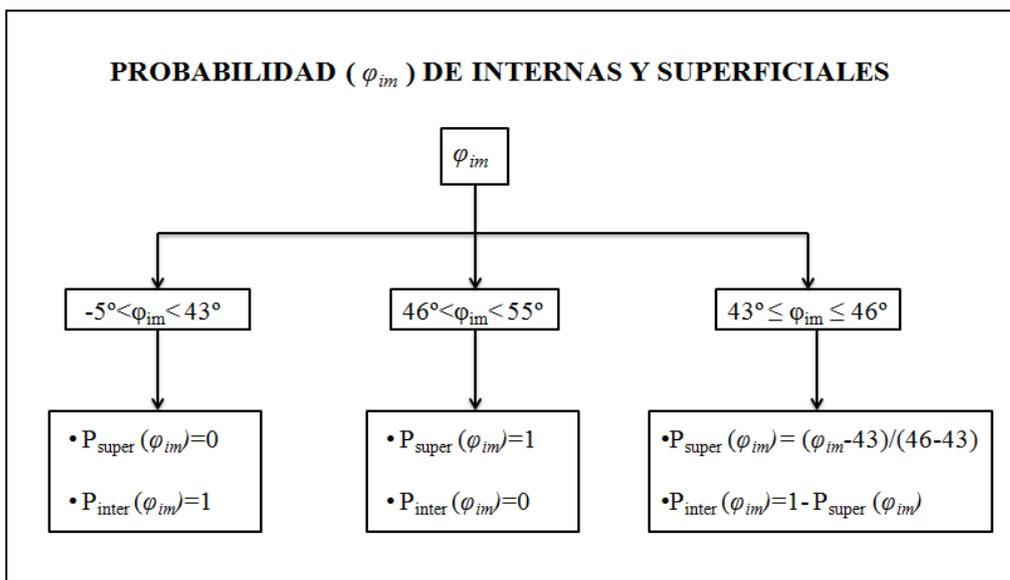


Figura 3.24. Cálculo probabilidad de internas y superficiales ( $\varphi_{im}$ )

En este caso y gracias a que sólo se necesita  $\varphi_{im}$  para la clasificación de los tres tipos de descargas parciales, la probabilidad obtenida con dicho parámetro corresponde a la probabilidad absoluta de cada fuente.

# Capítulo 4

## Desarrollo del *software* *off-line* de identificación de descargas parciales

En este capítulo se describe el desarrollo y diseño del *software*, así como cada uno de los elementos de los que está compuesto. También se desea que el capítulo proporcione a cualquier persona que quiera utilizarlo, las pautas necesarias para el manejo del programa.

### 4.1. SISTEMA DE DETECCIÓN Y ADQUISICIÓN

El circuito de detección, el cual corresponde al circuito de medida indirecto, y el montaje de laboratorio utilizado se muestran en la Figura 4.1 (véase 2.4.3.1):

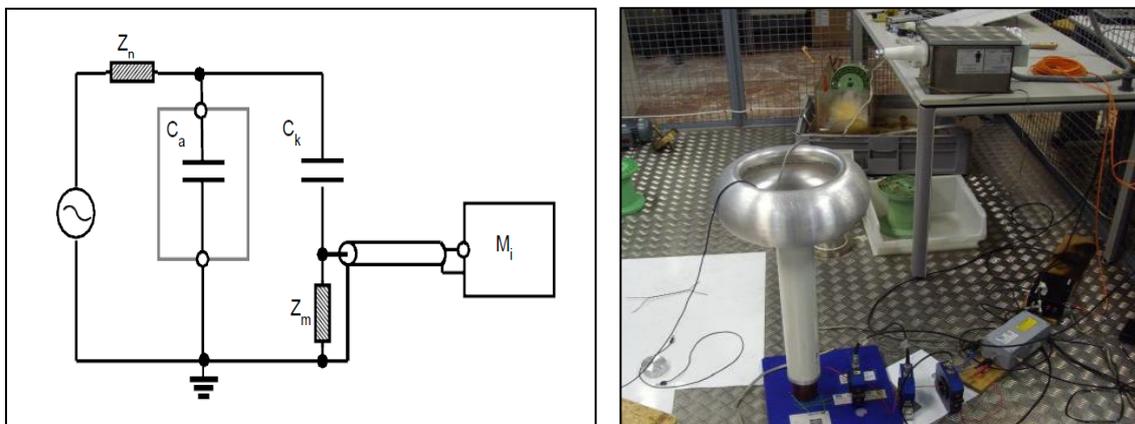


Figura 4.1. Esquema circuito indirecto de detección (izquierda) y montaje de laboratorio (derecha)

La versión final del sistema *LINEALT\_PROCESSING* está formada por un Chasis NI-PXIe-1082, el cual incorpora una tarjeta de adquisición de datos NI-PXIe-1082 de 2 canales de adquisición, con una frecuencia de muestreo de 200MS/s por canal y resolución vertical de 12 bit. Su controlador NI-PXIe-8115, es un procesador Intel dual core i5-2510E con 2 GB de memoria RAM. La señal de sincronismo se introduce en el canal de disparo “*trigger*” de la tarjeta, mientras que la de los pulsos de PDs se conecta al canal “0”. Para proteger la tarjeta de posibles fallas en sistemas de aislamiento, se configuró el canal de detección de PDs para una impedancia de 1 M $\Omega$ , conectando al coaxial un adaptador de 50  $\Omega$  a través de un conector en “T”.

El *software* encargado de la adquisición, cuantificación y tratamiento de los pulsos fue desarrollado en [30].

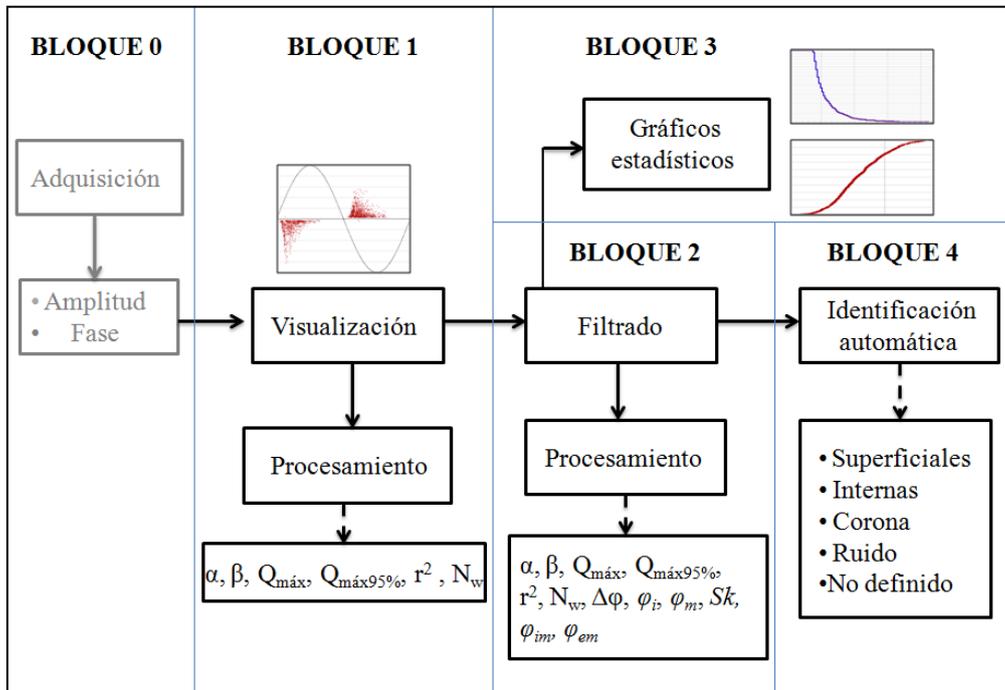
## 4.2. SOFTWARE DEL SISTEMA

El desarrollo de este módulo tiene como objetivos principales el análisis, caracterización y cuantificación del fenómeno de PDs. El objeto final consistirá en proporcionar al programa las herramientas necesarias para que él, de manera autónoma, sea capaz de determinar la fuente de PDs, sirviendo los resultados obtenidos para determinar si un equipo debe o no continuar en servicio.

El *software* presentado en este trabajo ofrece las siguientes prestaciones:

- Apertura y visualización de los pulsos adquiridos (PRPD). Las descargas parciales vendrán definidas por sus parámetros clásicos (Ángulo de fase  $\phi$  – Amplitud).
- Cálculo y visualización de los parámetros estadísticos correspondientes ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $Q_{\text{máx}}$ ,  $Q_{\text{máx}95\%}$ ,  $r^2$  y  $N_w$ ).
- Filtrado por fase y *trigger*: El programa proporcionará un filtrado en fase y amplitud para las descargas de polaridad positiva y otro para las de polaridad negativa.
- Actualización automática y visualización de los parámetros estadísticos correspondientes al PRPD una vez se haya filtrado ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $Q_{\text{máx}}$ ,  $Q_{\text{máx}95\%}$ ,  $r^2$ ,  $N_w$ ,  $\Delta\phi$ ,  $\phi_i$ ,  $\phi_m$ , *Skewness*,  $\phi_{im}$  y  $\phi_{em}$ ).
- Visualización, para el semiciclo positivo y para el negativo, de la distribución de amplitud  $H(q)$  y la gráfica acumulada de probabilidad de Weibull.
- Identificación automática de fuentes de descargas parciales (superficiales, internas y corona) y ruido.

La herramienta de programación utilizada para el desarrollo de esta aplicación fue *LabVIEW 2010*. En la Figura 4.2 se describe un diagrama esquemático de la estructura interna del código:



**Figura 4.2. Diagrama esquemático**

En la estructura del código mostrada en la Figura 4.2 se observa cómo el funcionamiento del programa es secuencial: El programa comienza en el Bloque 1, en el cual se visualizan y procesan los datos de amplitud y fase; en el Bloque 2 se realiza el filtrado, mostrando los parámetros estadísticos correspondientes; por último, a partir del segundo bloque, el programa proporciona la opción de visualizar los gráficos estadísticos (Bloque 3) o realizar la identificación automática (Bloque 4).

### 4.3. DISEÑO DEL PROGRAMA

La programación en *LabVIEW* se realiza a través de dos ventanas: La denominada *Front Panel*, que corresponde a la interfaz gráfica del usuario, y la ventana *Block Diagram*, donde se realiza la programación como tal [31], [32], [33].

A continuación se va a proceder a vincular algunas de las partes más singulares del *Front Panel*, con su respectivo código en el *Block Diagram*:

### 4.3.1. Selección de archivos

Para su uso, el sistema requiere únicamente dos archivos:

- Archivo de Fase: Está compuesto de un *array* en el que cada pulso de descarga parcial lleva asociado una fase, en nuestro caso la fase varía de 0 a 0,02s (un ciclo de red a 50Hz).
- Archivo de Amplitud: En este caso el archivo es una matriz de datos, en el que cada fila corresponde a un pulso distinto. Las columnas de esta matriz nos dan los valores de amplitud de todas las oscilaciones, es decir, la forma de onda completa de las descargas. En la siguiente figura se puede ver un pulso de PD completo, con todas sus oscilaciones:

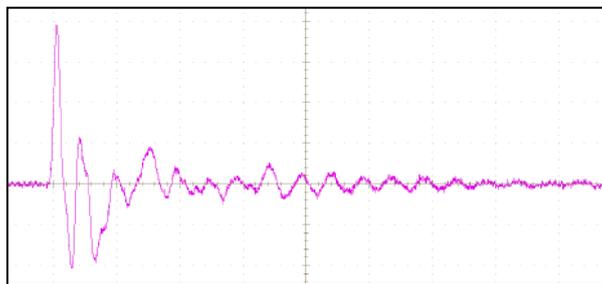


Figura 4.3. Pulso completo de PD

Para determinar la magnitud de la descarga parcial, deberán obviarse las oscilaciones de menor magnitud, únicamente el mayor valor está relacionado completamente con la carga aparente de la PD [30].

Con el objetivo de seleccionar la magnitud de PD de la matriz de amplitudes y asociarla a su fase se ha programado el siguiente código:

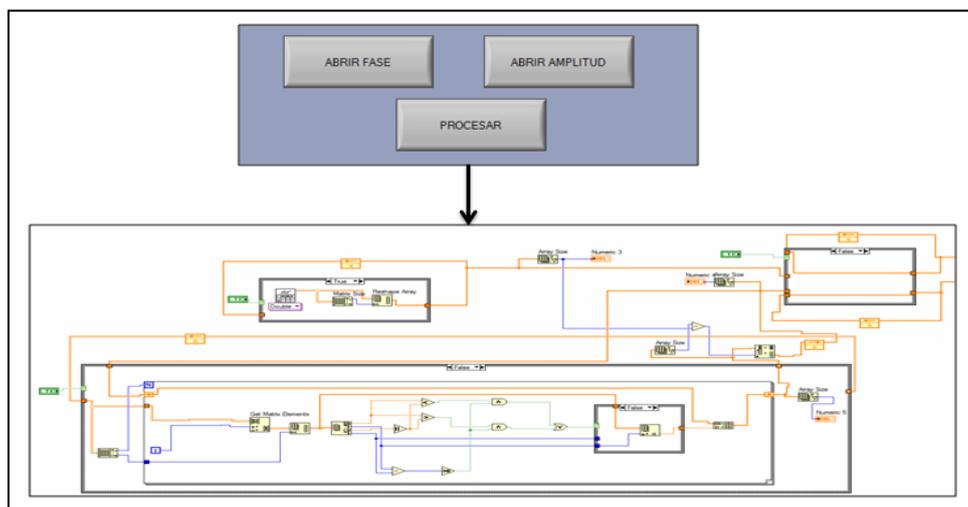


Figura 4.4. Apertura de archivos y su código

### 4.3.2. Escalado y forma de onda sinusoidal

El programa tiene la capacidad de ajustar la amplitud máxima de las pantallas de visualización de los patrones PRPDs. En la siguiente figura se muestra el control del escalado en el panel de usuario junto a su programación en el *Block Diagram*:

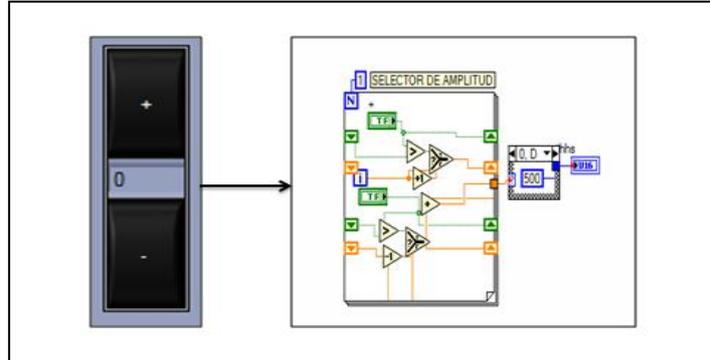


Figura 4.5. Escalado de amplitud

### 4.3.3. Filtrado por fase y *trigger*

En un segundo nivel de análisis, el sistema ofrece la opción de realizar un filtrado, pudiendo eliminar aquellas descargas que no se deseen. Este filtrado, independiente para descargas de polaridad positiva y negativa, se lleva a cabo a través de cuatro cursores de fase y otros cuatro de amplitud:

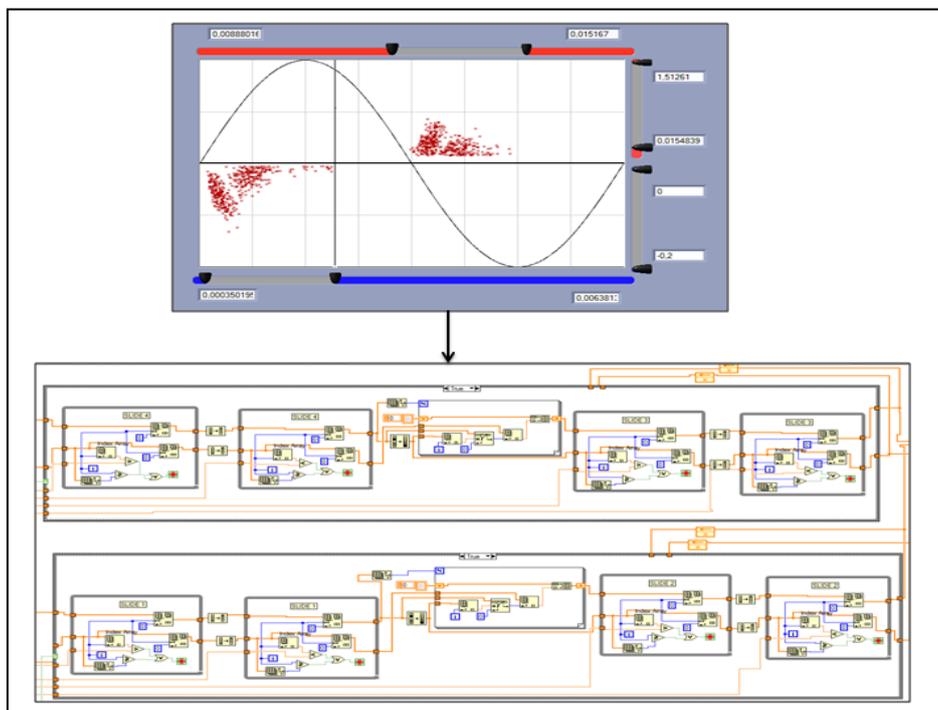


Figura 4.6. Filtrado por fase y *trigger*

#### 4.3.4. Identificación automática

El resultado final de la programación del primer algoritmo diseñado en el anterior capítulo (véase 3.3.2), queda de la siguiente manera:

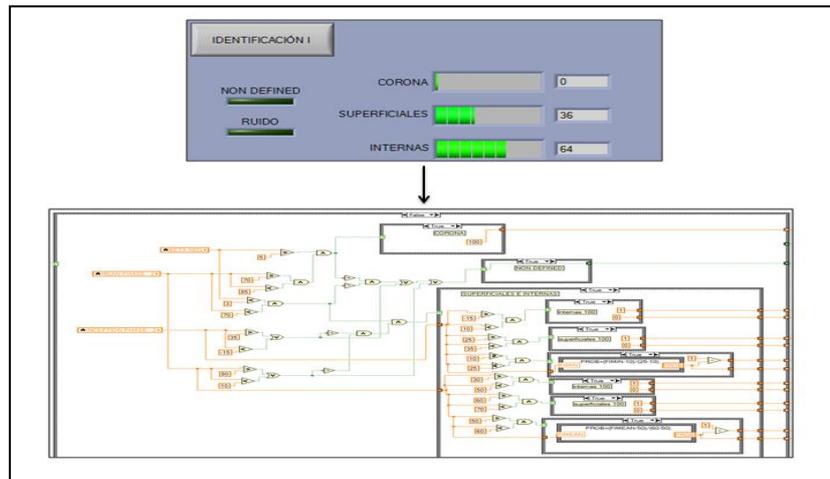


Figura 4.7. Identificación automática

#### 4.4. PANEL DE USUARIO

La interfaz de usuario consta de 3 pestañas: La primera de ellas corresponde a la adquisición, visualización del patrón PRPD y cálculo de los parámetros estadísticos; la segunda permite el filtrado, muestra sus parámetros estadísticos y, además, tiene como opcional la identificación automática; por último, la tercera ventana presenta los gráficos estadísticos.

##### 4.4.1. Primera pestaña

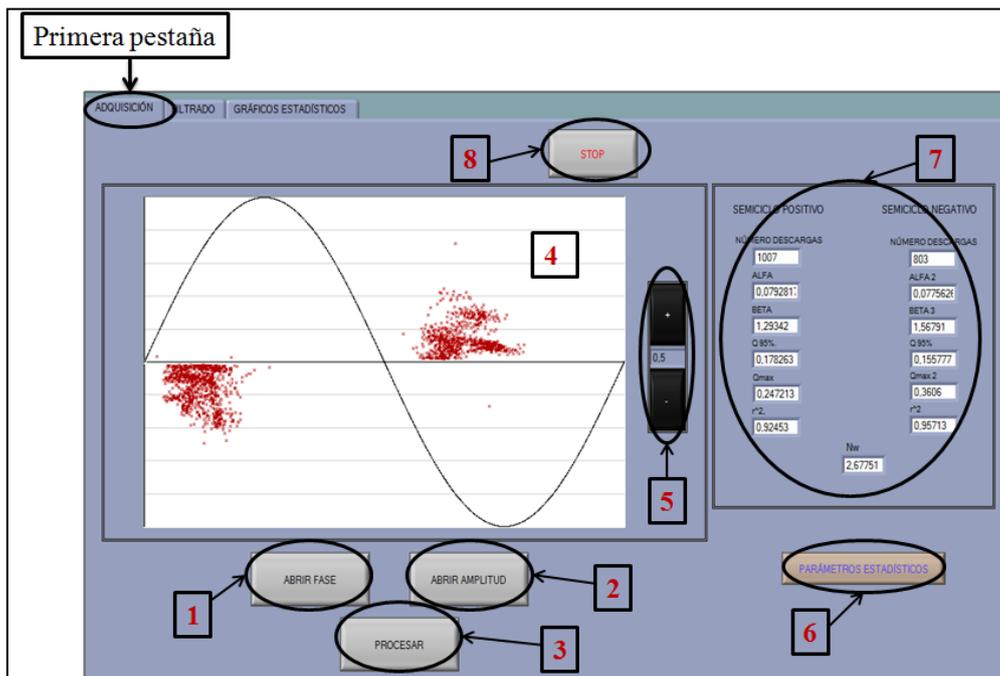


Figura 4.8. Interfaz de usuario (primera pestaña)

1. Selecciona y abre el archivo de fase.
2. Selecciona y abre el archivo de amplitud.
3. Procesa y envía los datos al resto del programa.
4. Pantalla de visualización de PRPDs.
5. Control de escala: Amplitud máxima de la pantalla de visualización, ajusta la visualización de los PRPDs y la forma de la onda sinusoidal.
6. Calcula los parámetros estadísticos del proceso en curso.
7. Visualización de los parámetros estadísticos calculados.
8. *Stop*: Parada de todo el programa.

#### 4.4.2. Segunda pestaña

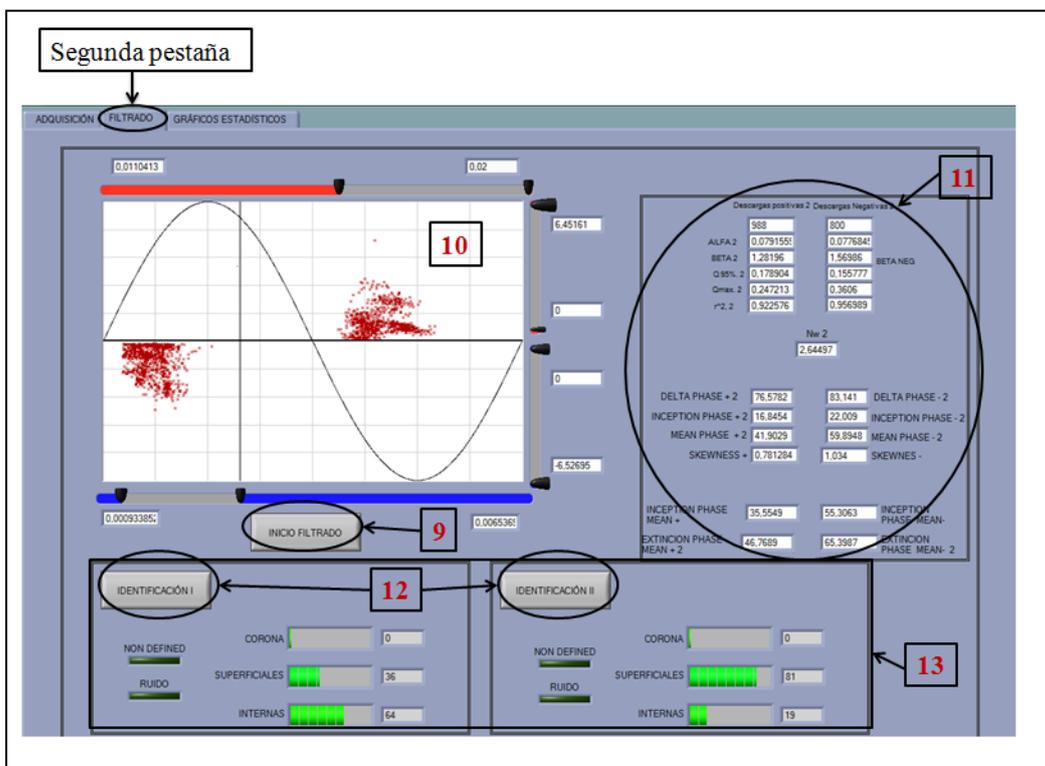


Figura 4.9. Interfaz de usuario (segunda pestaña)

9. Visualiza los datos cargados previamente en la primera pestaña.
10. Pantalla de visualización y filtrado por fase y amplitud.
11. Visualización de los parámetros estadísticos (cualquier cambio en el filtrado actualiza los parámetros estadísticos de manera instantánea).
12. Activa cada uno de los algoritmos de identificación utilizando los parámetros estadísticos que haya en ese momento.
13. Visualización de la fuente de PDs y su correspondiente probabilidad.

### 4.4.3. Tercera pestaña

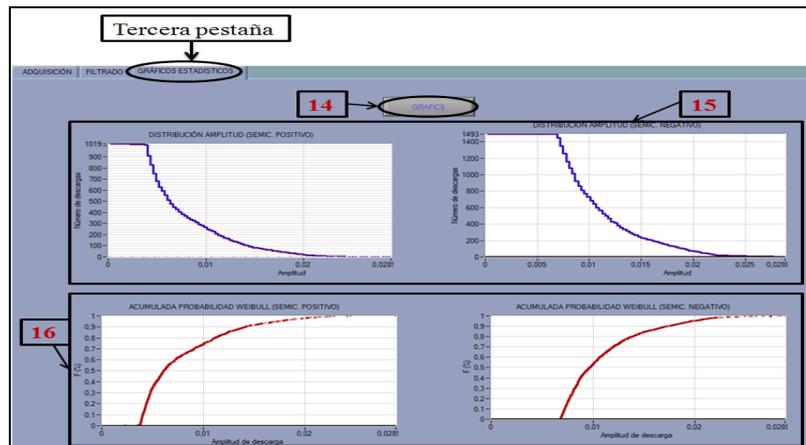


Figura 4.10. Interfaz de usuario (tercera pestaña)

14. Visualiza los gráficos estadísticos a partir de los datos que le llegan desde la segunda pestaña.
15. Pantallas fijas autoescalables de visualización de la distribución de amplitud (una pantalla por semiciclo).
16. Pantallas fijas autoescalables de visualización de la acumulada de probabilidad de Weibull (una pantalla por semiciclo).

### 4.4.4. Funcionamiento

En este apartado se procederá a realizar un ejemplo del funcionamiento del programa, mostrando los pasos a seguir y los distintos opcionales que ofrece el sistema:

Una vez iniciado el programa, por defecto el *software* aparecerá en la primera pestaña, donde hay que cargar los archivos de fase y amplitud que se quieran estudiar. Para ello, hay que hacer clic en los botones “ABRIR FASE” y “ABRIR AMPLITUD”, y seleccionar en cada caso el archivo correspondiente. La ventana que nos aparece al pulsar sobre estos botones es la siguiente:

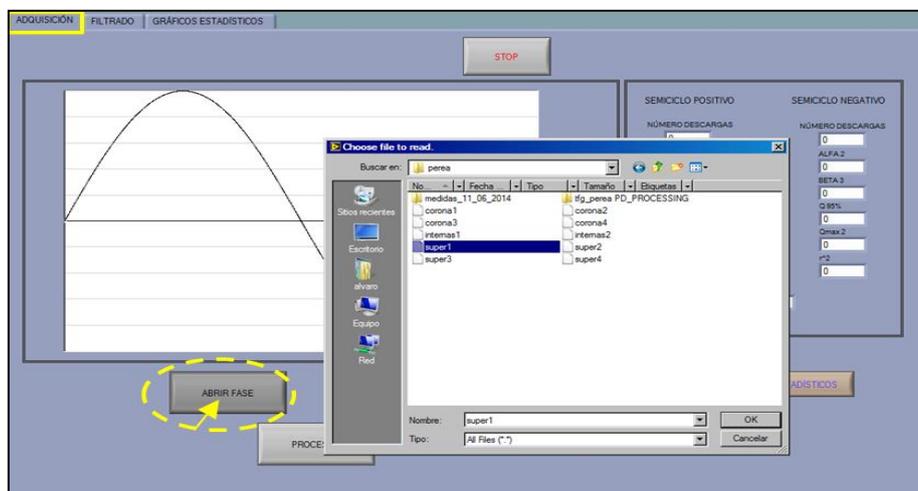
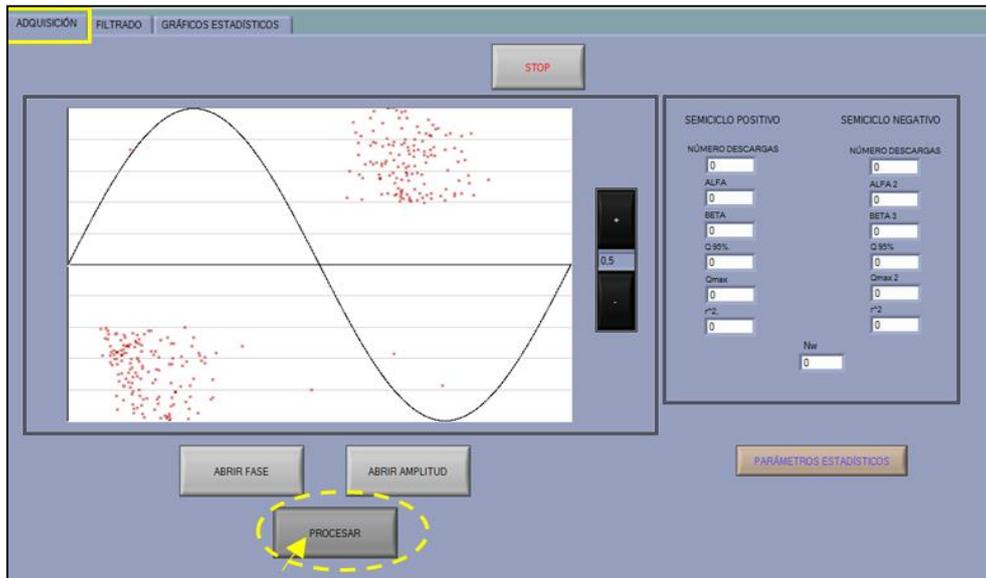


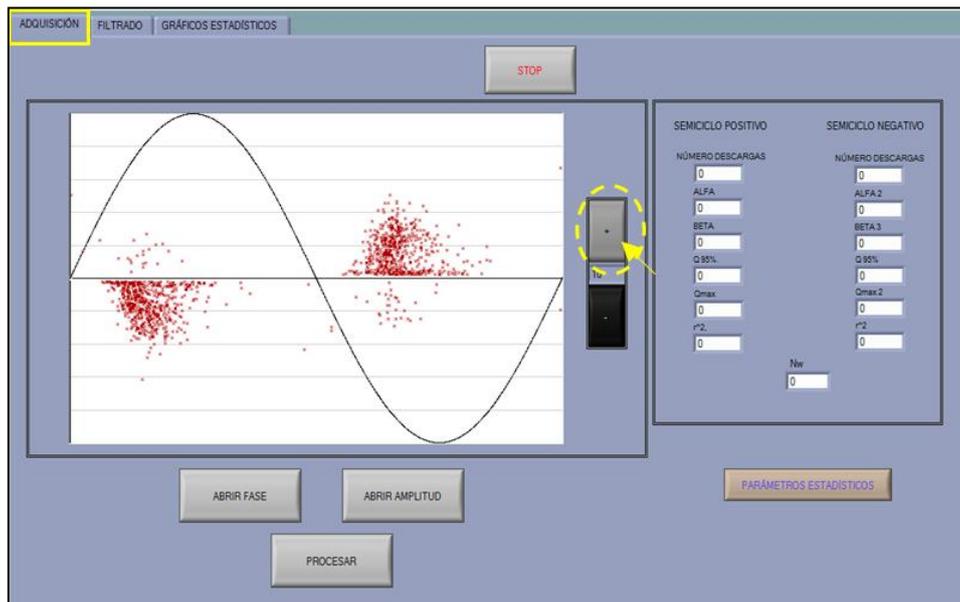
Figura 4.11. Cargar archivos de datos

El botón “PROCESAR” tiene dos funciones: Una es la de procesar y visualizar los archivos ya cargados; la otra función es la de permitir cargar unos archivos distintos a los que se están estudiando, dejándolos en *stand-by* hasta que el usuario decida utilizarlos. De esta forma, para visualizar los archivos cargados previamente y utilizarlos en todo el programa, basta con pulsar el botón “PROCESAR”:



**Figura 4.12. Visualización de datos**

Tal y como se puede apreciar en la anterior figura, no aparecen todas las descargas cargadas. Para solucionar este problema, se debe adecuar la escala de amplitud de la pantalla utilizando los selectores de escala de color negro que se encuentran a la derecha de ésta. El programa proporciona un total de 14 escalados distintos, por ello, en cada caso se deberá elegir el nivel que mejor se ajuste:



**Figura 4.13. Ajuste escalado**

En esta pestaña, si se desea, el programa ofrece la posibilidad de calcular los parámetros estadísticos correspondientes al PRPD que se está visualizando, esto se consigue pulsando en “PARÁMETROS ESTADÍSTICOS”:

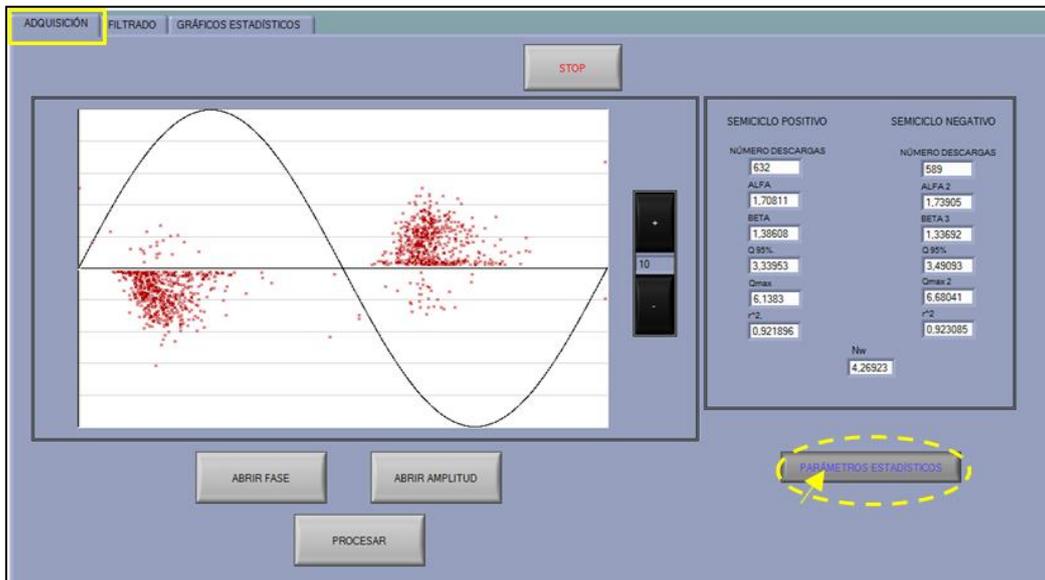


Figura 4.14. Cálculo parámetros estadísticos

Para pasar a la segunda pestaña basta con hacer clic en “FILTRADO”. Lo primero que hay que hacer es cargar en esta pestaña los datos de la anterior, para ello hay que pulsar el botón “INICIO FILTRADO” y automáticamente se visualizará el PRPD a la escala seleccionada anteriormente y se calcularán los parámetros estadísticos:

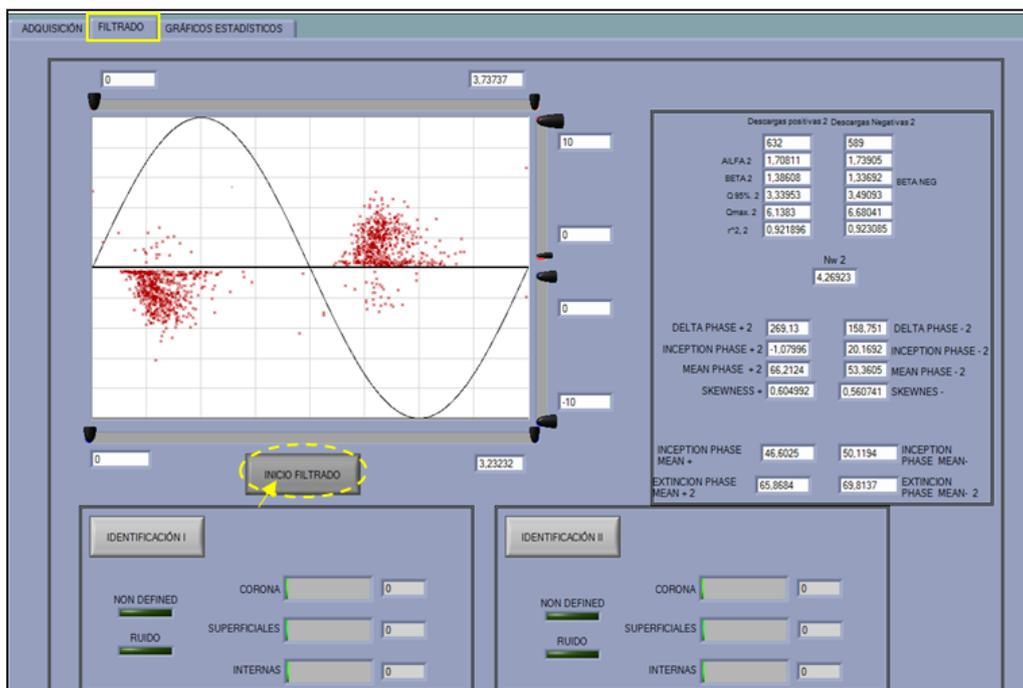
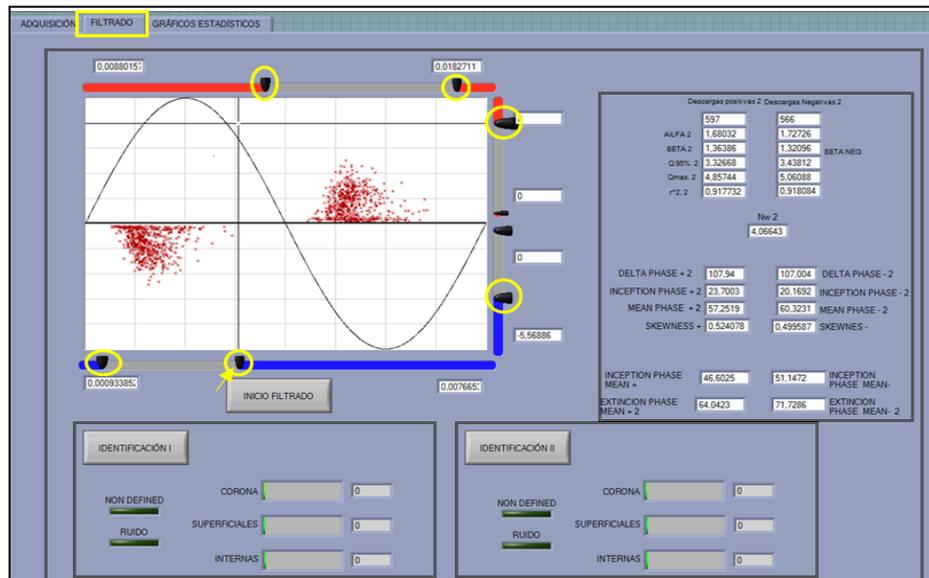


Figura 4.15. Inicio del filtrado

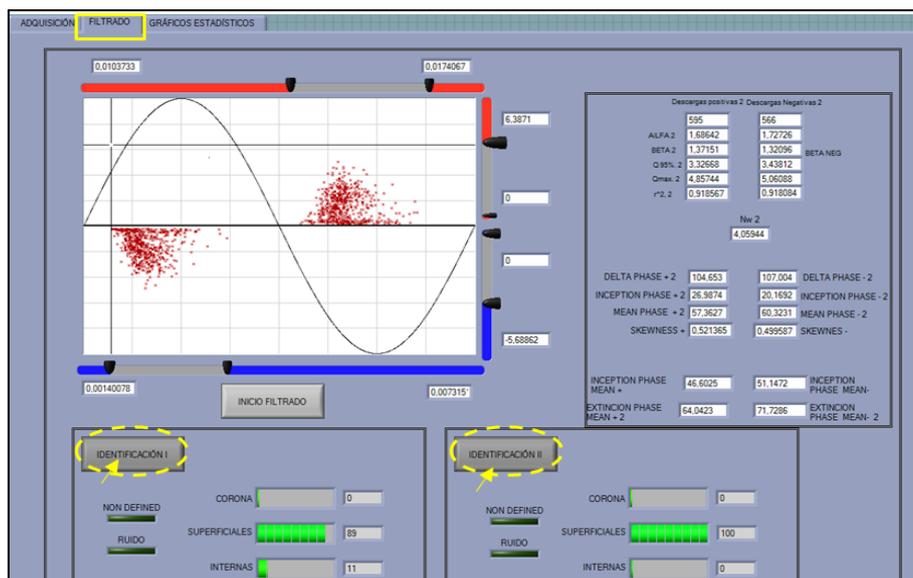
Una vez cargados los datos, se puede utilizar el filtrado por fase o amplitud para eliminar aquellas descargas que no se quieran tener en cuenta en el análisis. Para llevar a cabo el filtrado, basta con arrastrar los cursores hasta la posición deseada:



**Figura 4.16. Ejemplo de filtrado en fase y amplitud**

A diferencia de la primera pestaña, en ésta los parámetros estadísticos se recalculan de manera automática e instantánea con cualquier movimiento de los cursores.

El último opcional que ofrece esta pestaña es la realización de la identificación de la tipología de los pulsos que se estén visualizando en la pantalla de filtrado. Para que el programa muestre la fuente de descargas parciales hay que pulsar el botón “IDENTIFICACIÓN I” o “IDENTIFICACIÓN II” según se quiera aplicar un algoritmo u otro:



**Figura 4.17. Identificación automática**

El botón “IDENTIFICACIÓN I” activa el primer algoritmo de decisión (véase 3.3.2), y en caso de pulsar “IDENTIFICACIÓN II” se optaría por el segundo sistema de identificación (véase 3.3.3).

Por último, en la tercera pestaña se puede visualizar la distribución de amplitud  $H(q)$  y la acumulada de probabilidad de Weibull. Para mostrar los gráficos hay que clicar sobre “GRAFICS” y el programa calculará los gráficos correspondientes al PRPD de la segunda pestaña, es decir, una vez realizado el filtrado:

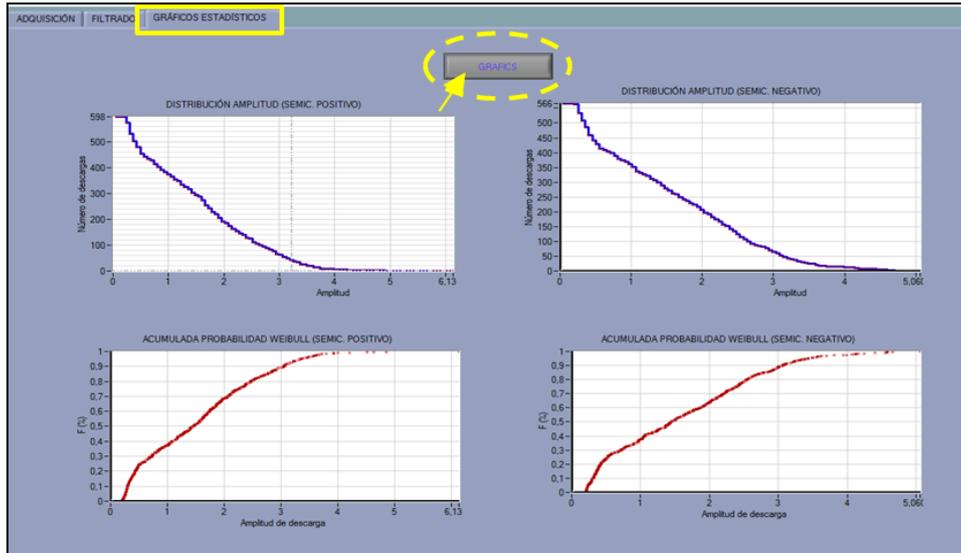


Figura 4.18. Gráficos estadísticos

# Capítulo 5

---

## Aplicación del sistema de clasificación de patrones

En este capítulo se pondrá a prueba el sistema de identificación del *software* *LINEALT\_PROCESSING* desarrollado en el *Capítulo 3*. El objeto principal del capítulo es comprobar el funcionamiento de los dos algoritmos de clasificación, utilizando para ello las adquisiciones de la base de datos que posee el Laboratorio de Investigación y Ensayos en Alta Tensión (LINEALT) de la Universidad Carlos III de Madrid.

El capítulo estará estructurado de la siguiente manera: En un primer apartado se verificará y analizará el comportamiento tanto del primer algoritmo de decisión (basado en los parámetros de los patrones PRPD propuestos en la bibliografía [véase 3.3.2]), como del segundo (véase 3.3.3); Por último, se compararán los resultados obtenidos con los dos métodos de identificación con el propósito de establecer las carencias de cada algoritmo y poder así proponer posibles mejoras.

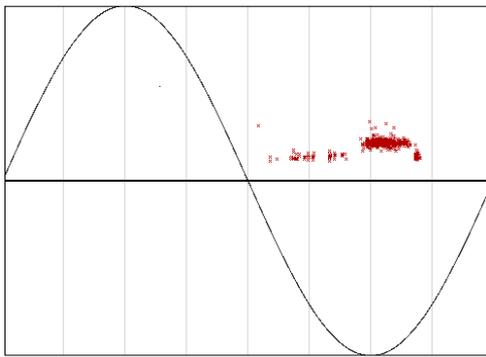
### 5.1. RESULTADOS DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE IDENTIFICACIÓN

Para llevar a cabo el testeo de los algoritmos, se procesarán de la base de datos citada anteriormente, los archivos contenidos en las carpetas que tienen por nombre cada una de las tres clases de descargas parciales (corona, superficiales e internas) que el operador esperaba tener. De estas adquisiciones, se desconocen los objetos y las condiciones en las que fueron realizados estos ensayos, por lo que en algún caso puede que el objeto de ensayo no generara el tipo de descarga que se esperaba de él.

Los resultados de estos archivos se presentarán con su respectivo patrón PRPD, una tabla con los parámetros estadísticos que intervienen en la identificación y la imagen con el resultado de la clasificación mostrada por el programa *LINEALT\_PROCESSING*.

### 5.1.1. Carpeta Corona

- Archivo corona 2700v1



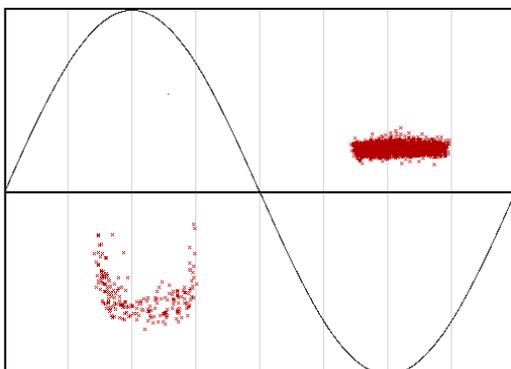
	Corona 2700v1	
	Semiciclo Positivo	Semiciclo Negativo
$\beta$	-	6,73
$\varphi_i$	-	7,75
$\varphi_m$	-	94,67
$\varphi_{im}$	-	89,71
$\Delta\varphi$	-	118,44

Figura 5.1. PRPD corona 2700v1 (izquierda) y tabla de resultados (derecha)



Figura 5.2. Resultados corona 2700v1: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo)

- Archivo corona 2700v5



	Corona 2700v5	
	Semiciclo Positivo	Semiciclo Negativo
$\beta$	6,54	9,28
$\varphi_i$	63,39	64,41
$\varphi_m$	96,25	98,05
$\varphi_{im}$	72,49	68,48
$\Delta\varphi$	72,18	69,43

Figura 5.3. PRPD corona 2700v5 (izquierda) y tabla de resultados (derecha)

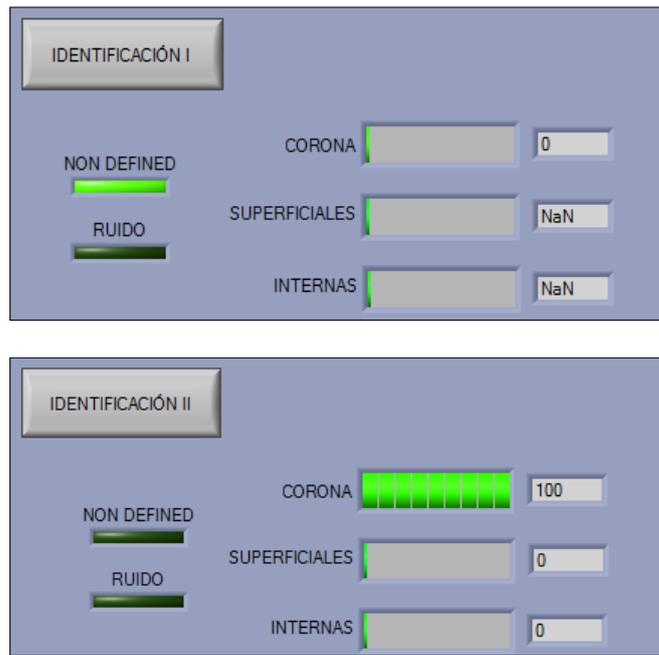
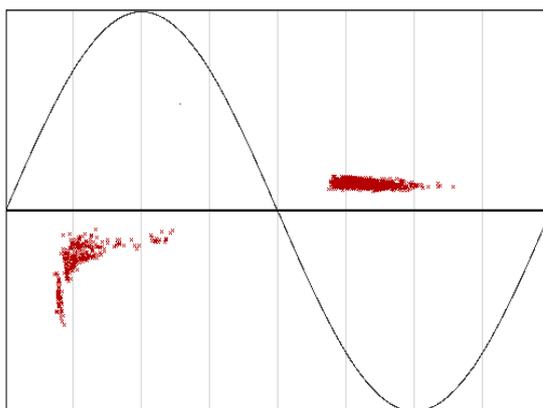


Figura 5.4. Resultados corona 2700v5: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo)

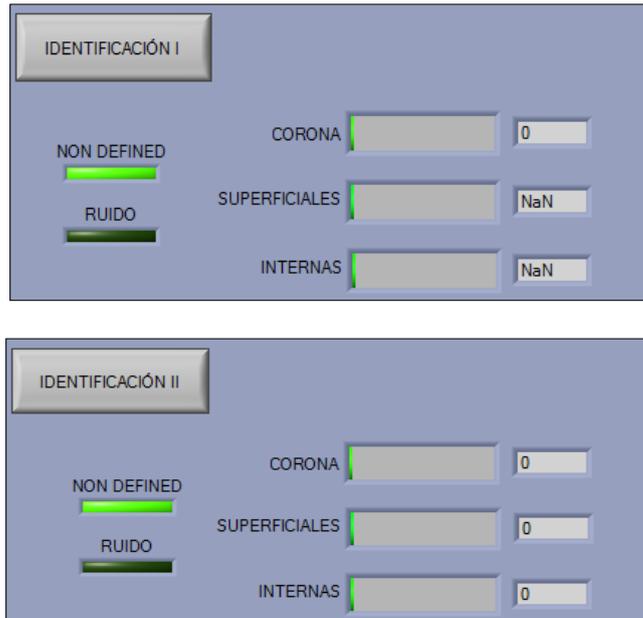
En primer lugar, observando los resultados de los ensayos 2700v1 y 2700v5 se puede ver cómo, el primer sistema los identifica como *non defined* (véase Figura 5.2 y 5.4), lo que se produce debido al elevado valor de  $\varphi_m$ , el cual en ambos casos supera los  $85^\circ$ , valor umbral definido en el *Capítulo 3* para este método. Por el contrario, el segundo método de clasificación reconoce los dos archivos como descargas parciales corona.

- Archivo corona cor



	Corona cor	
	Semiciclo Positivo	Semiciclo Negativo
$\beta$	2,29	9,32
$\varphi_i$	32,75	33,56
$\varphi_m$	50,24	55,49
$\varphi_{im}$	35,75	37,85
$\Delta\varphi$	77,78	82,24

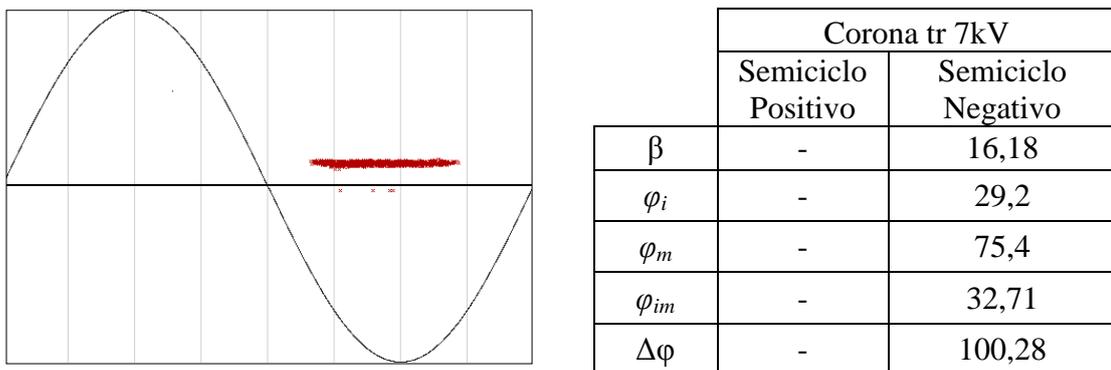
Figura 5.5. PRPD corona cor (izquierda) y tabla de resultados (derecha)



**Figura 5.6. Resultados corona cor: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo)**

En el caso del archivo *cor*, la anterior figura muestra que los dos algoritmos califican el PRPD como *non defined*, lo que es consecuencia de unos valores de  $\varphi_m$  y  $\varphi_{im}$  muy bajos, menores que los valores umbrales establecidos (véase 3.3.1 y 3.3.3). La singularidad de este patrón podría deberse a una tensión aplicada durante el ensayo elevada, lo que hace que las descargas aparezcan en un fase más temprana. En cualquier caso, parece una actividad de descargas corona bastante atípica.

- Archivo corona tr 7kV



**Figura 5.7. PRPD corona tr 7kV (izquierda) y tabla de resultados (derecha)**





Figura 5.8. Resultados corona tr 7kV: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo)

- Archivo corona trin 5kV

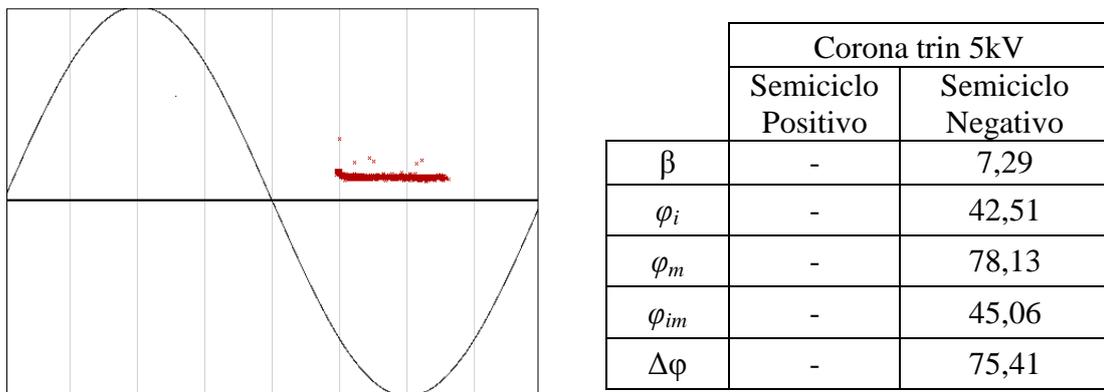


Figura 5.9. PRPD corona trin 5kV (izquierda) y tabla de resultados (derecha)

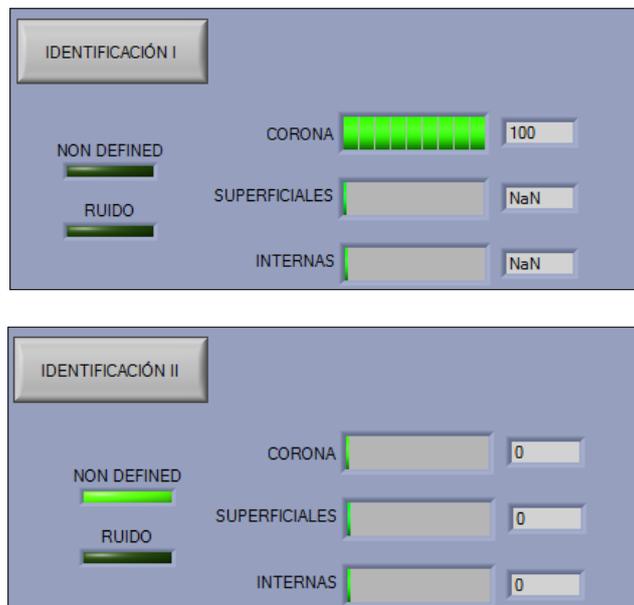


Figura 5.10. Resultados corona trin 5kV: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo)

En cuanto a las adquisiciones *tr 7kV* y *trin 5kV*, en la Figura 5.8 y 5.10 se aprecia cómo el primer sistema los clasifica como corona. Sin embargo, el segundo algoritmo los clasifica como *non defined*, lo cual se debe, al igual que en el caso del archivo *cor*, a un  $\varphi_{im}$  menor que los  $60^\circ$  que se han estipulado como valor umbral para esta tipología.

### 5.1.2. Carpeta Superficiales

- Archivo superficiales lámina\_1-8kV\_elecgrande

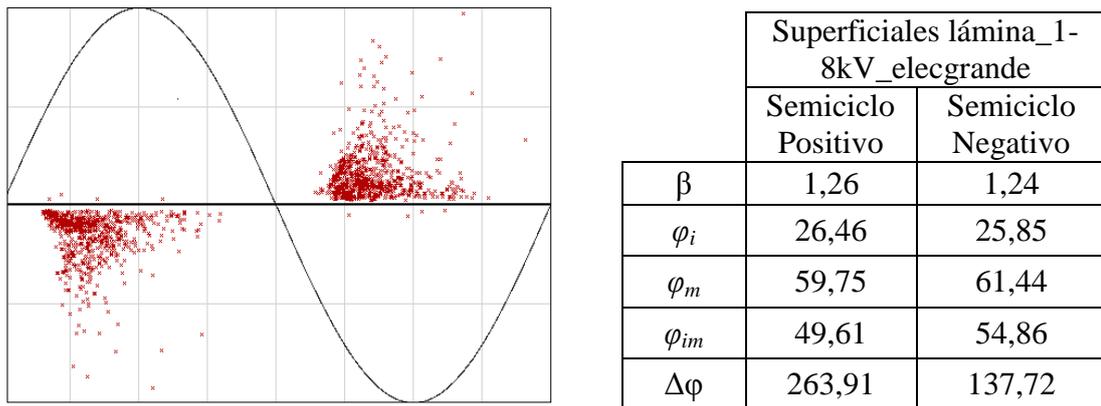


Figura 5.11. PRPD superficiales lámina\_1-8kV\_elecgrande (izquierda) y tabla de resultados (derecha)

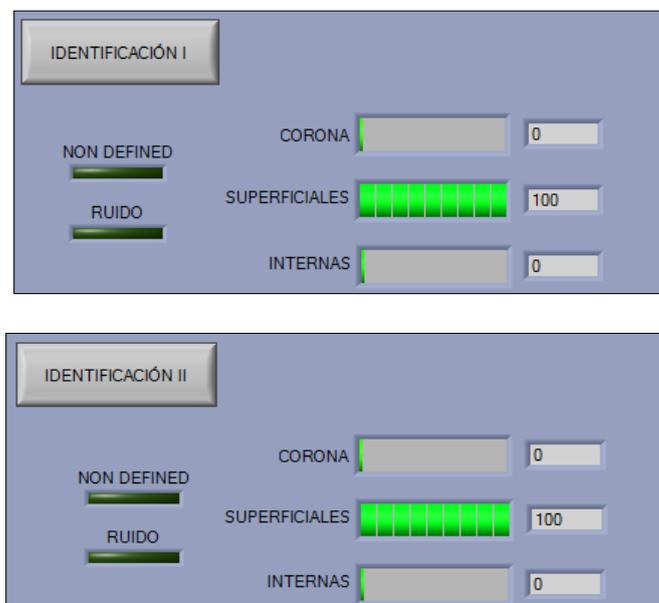


Figura 5.12. Resultados corona lámina\_1-8kV\_elecgrande: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo)

- Archivo superficiales lámina\_1-8kV

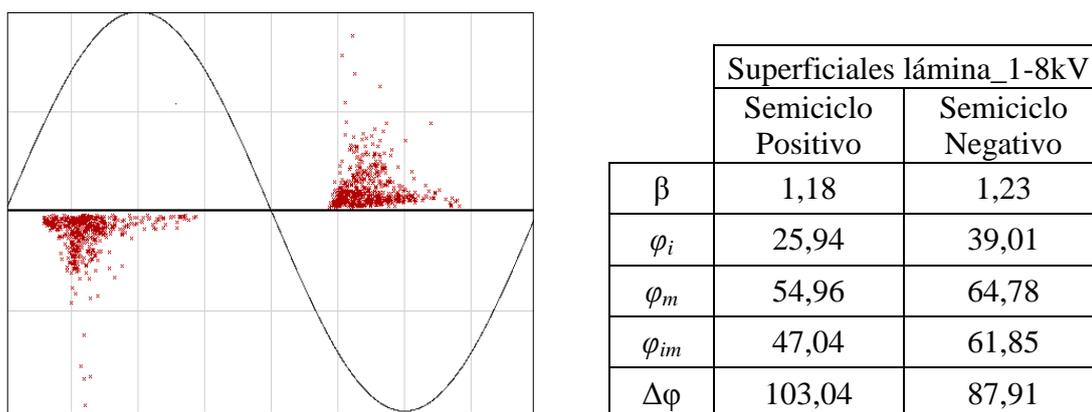


Figura 5.13. PRPD superficiales lámina\_1-8kV (izquierda) y tabla de resultados (derecha)

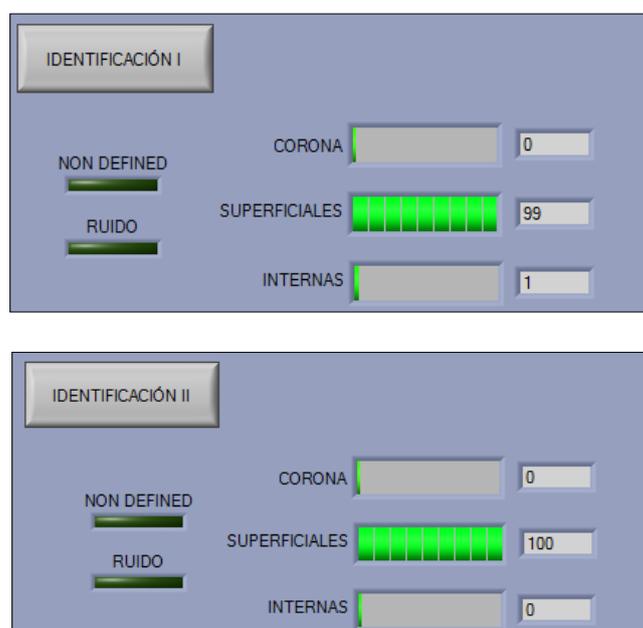


Figura 5.14. Resultados superficiales lámina\_1-8kV: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo)

De la observación los resultados obtenidos para los casos de *lámina\_1-8kV\_elecgrande* y *lámina\_1-8kV* se puede ver cómo ambos sistemas determinan que estas adquisiciones pertenecen a descargas parciales superficiales. Características como la alta variabilidad de los pulsos en la zona de máxima tensión de la onda sinusoidal (bajo valor de  $\beta$ ) y el elevado valor de  $\varphi_i$  y de  $\varphi_m$ , hacen que estos PRPDs sean propios de descargas superficiales.

- Archivo superficiales nomex1200

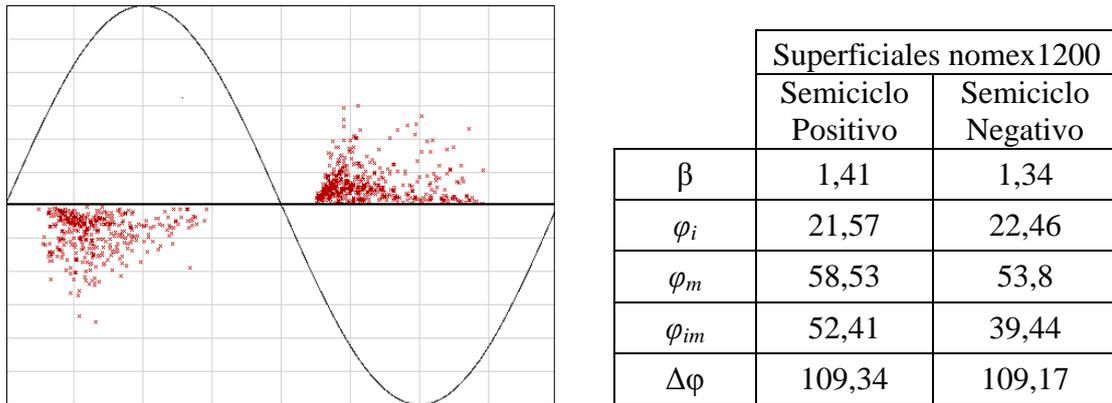


Figura 5.15. PRPD superficiales nomex1200 (izquierda) y tabla de resultados (derecha)

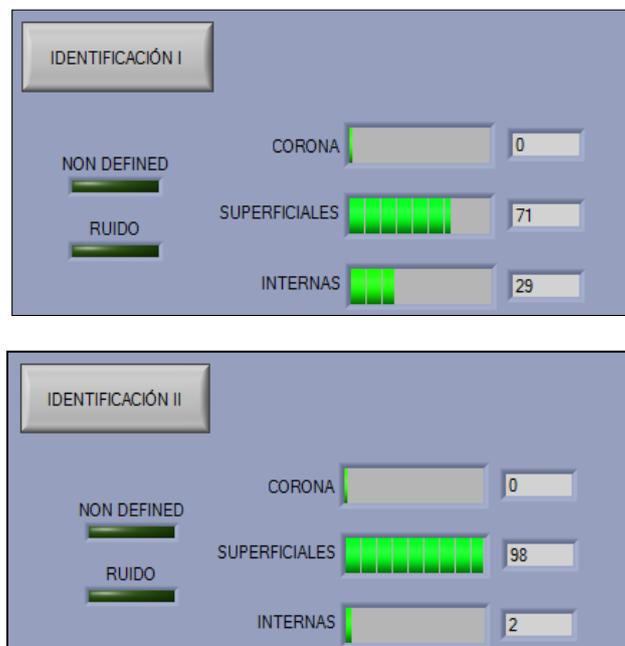


Figura 5.16. Resultados superficiales nomex1200: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo)

Examinando los resultados del archivo *nomex1200*, en la anterior figura se puede percibir que el primer método otorga una probabilidad a superficiales del 71%. Por otro lado, el segundo método concede a esta misma fuente prácticamente el 100% (98%), lo que resulta de gran utilidad, ya que despeja las dudas existentes derivadas del primer algoritmo. Aun con este resultado, que las descargas de mayor magnitud no se produzcan en la zona de máxima tensión de la onda sinusoidal puede indicar que, debido a la rugosidad del plano de tierra, se estén produciendo descargas internas entre la lámina y éste.

- Archivo superficiales nomex1600

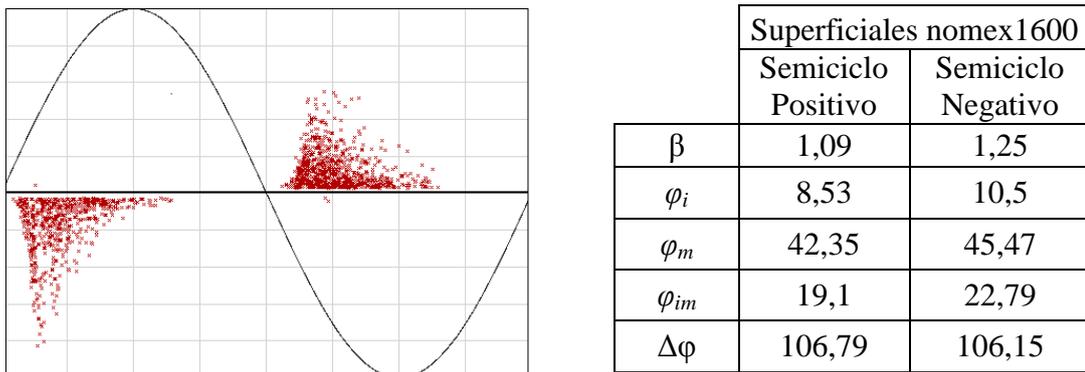


Figura 5.17. PRPD superficiales nomex1600 (izquierda) y tabla de resultados (derecha)

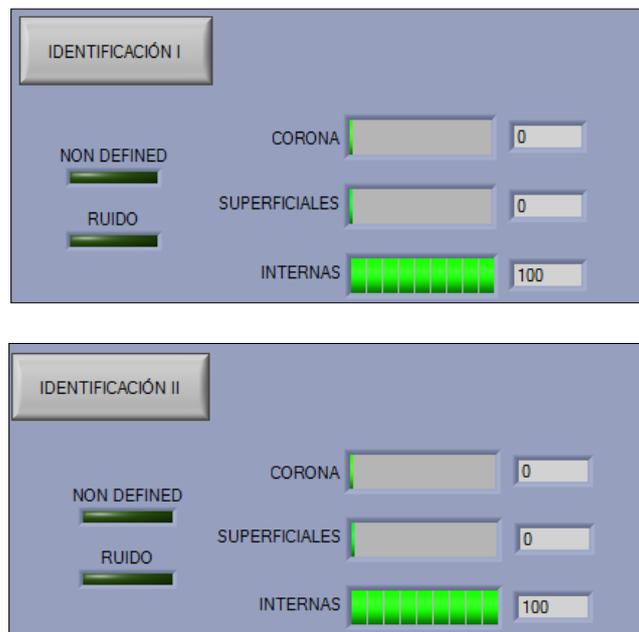


Figura 5.18. Resultados superficiales nomex1600: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo)

En cuanto a los resultados de *nomex1600*, observando la Figura 5.18 se ve cómo ambas clasificaciones apuntan que las descargas parciales son internas. Hay que puntualizar que el PRPD obtenido en este ensayo es muy peculiar, ya que posee una alta variabilidad de las descargas cercanas a la fase de inyección, lo cual unido a un valor bajo de éste parámetro, hacen que este PRPD posea cualidades típicas de descargas parciales internas. Al igual que sucedía en el anterior ensayo, en el laboratorio se han detectado patrones de este tipo en láminas aislantes depositadas sobre el plano de tierra, que, al ser rugoso, si la tensión es muy elevada, puede provocar descargas internas en las oquedades de aire.

- Archivo superficiales par

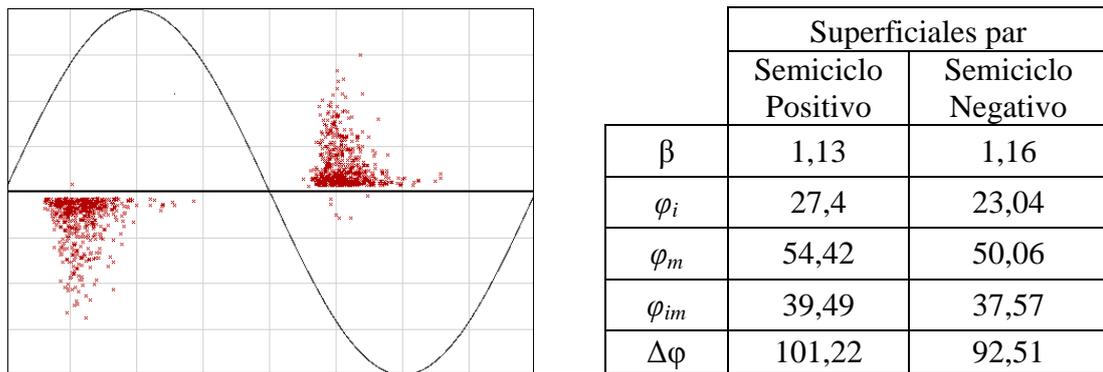


Figura 5.19. PRPD superficiales par (izquierda) y tabla de resultados (derecha)

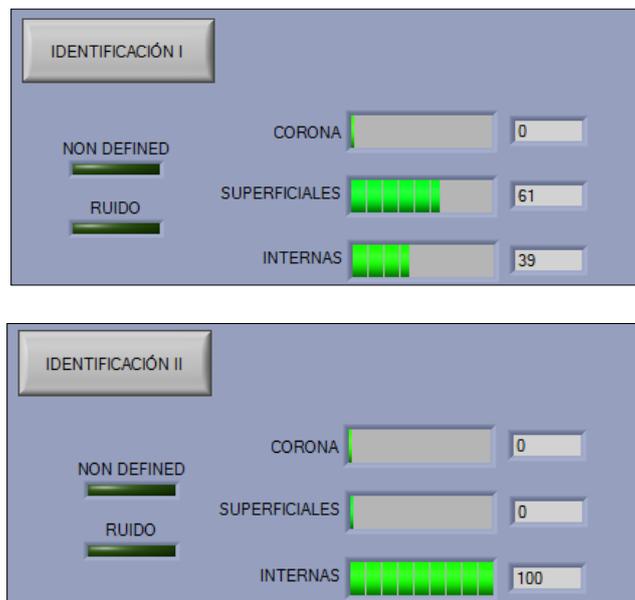


Figura 5.20. Resultados superficiales par: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo)

Por último, se han obtenido resultados contrapuestos para el archivo *par*. El primer método concede una probabilidad del 61% a superficiales (véase Figura 5.20), y por el contrario, el segundo sistema estipula que las descargas son internas al 100%.

Si bien es cierto que a simple vista no es posible determinar que las descargas sean del tipo superficial, para intentar llegar a una conclusión con ciertas garantías, habría que apoyarse un estudio más exhaustivo en el que se tuvieran en cuenta otros parámetros estadísticos como la *kurtosis*, la *skewness* o el ángulo de extinción medio. Por el título del fichero, parece que el objeto de ensayo es un par trenzado, que, típicamente, genera descargas superficiales.

### 5.1.3. Carpeta Internas

- Archivo internas 8kV 1+1+1 3vacuolas1

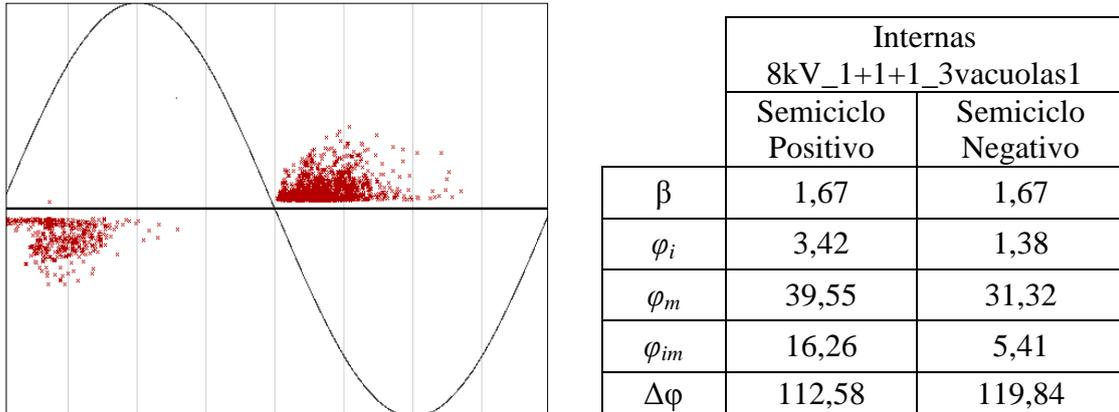


Figura 5.21. PRPD internas 8kV\_1+1+1\_3vacuolas1 (izquierda) y tabla de resultados (derecha)

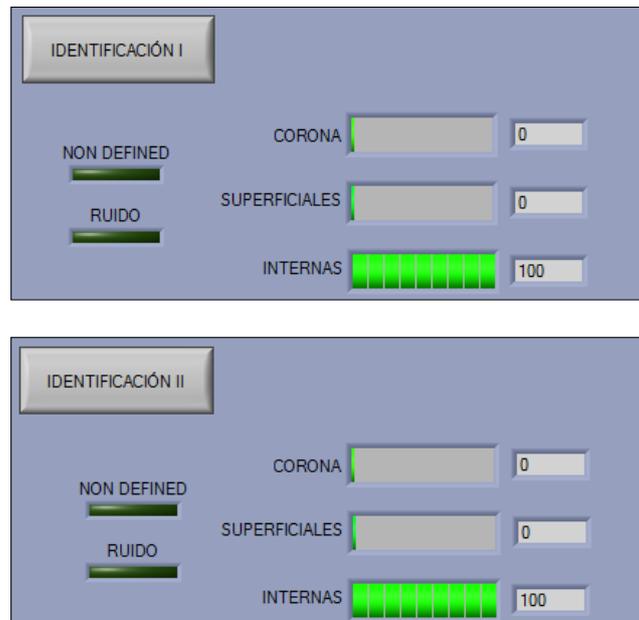


Figura 5.22. Resultados internas 8kV\_1+1+1\_3vacuolas1: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo)

- Archivo internas 2vacuolas\_7kV

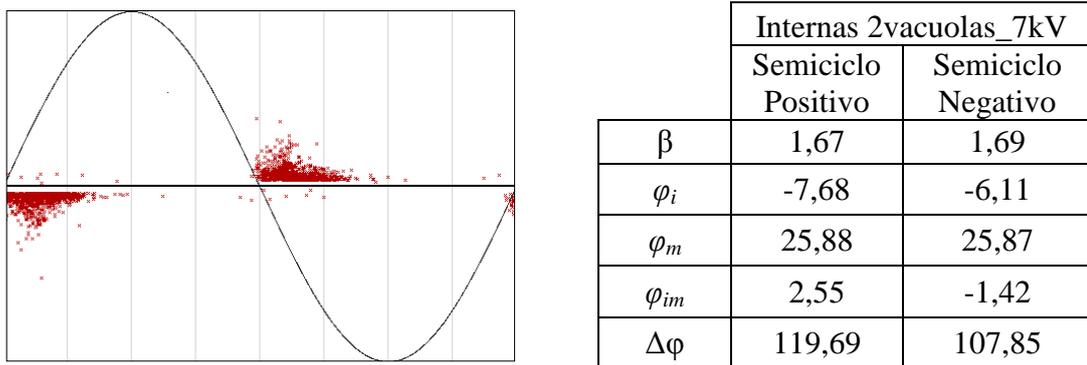


Figura 5.23. PRPD internas 2vacuolas\_7kV (izquierda) y tabla de resultados (derecha)

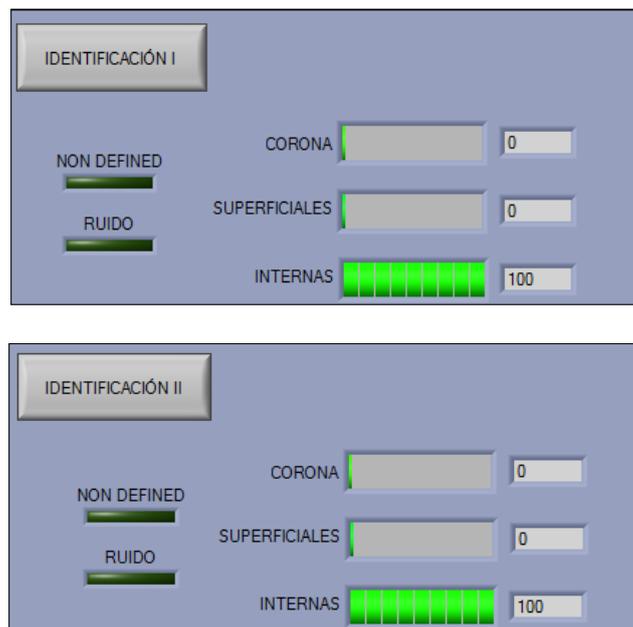


Figura 5.24. Resultados internas 2vacuolas\_7kV: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo)

- Archivo internas meta\_14kV

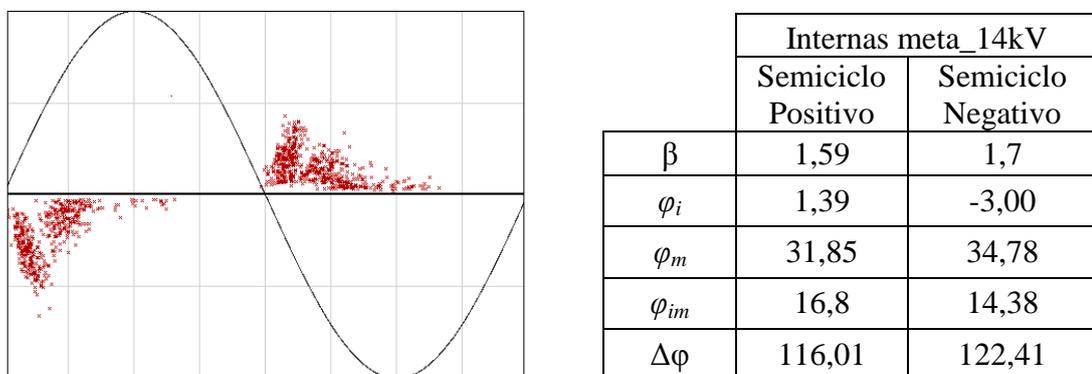
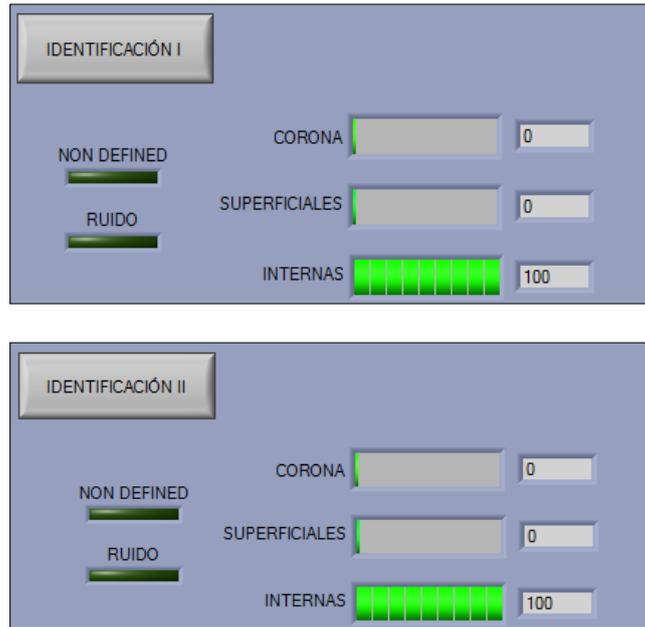


Figura 5.25. PRPD internas meta\_14kV (izquierda) y tabla de resultados (derecha)

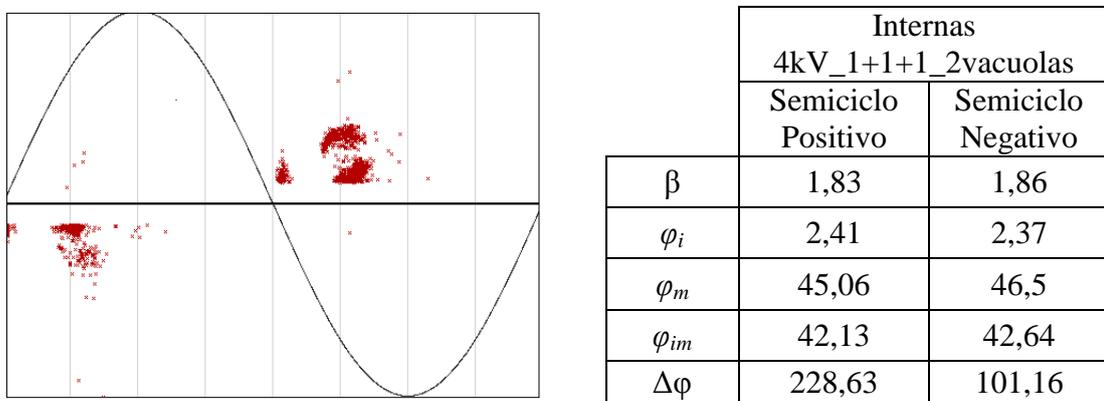


**Figura 5.26. Resultados internas meta\_14kV: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo)**

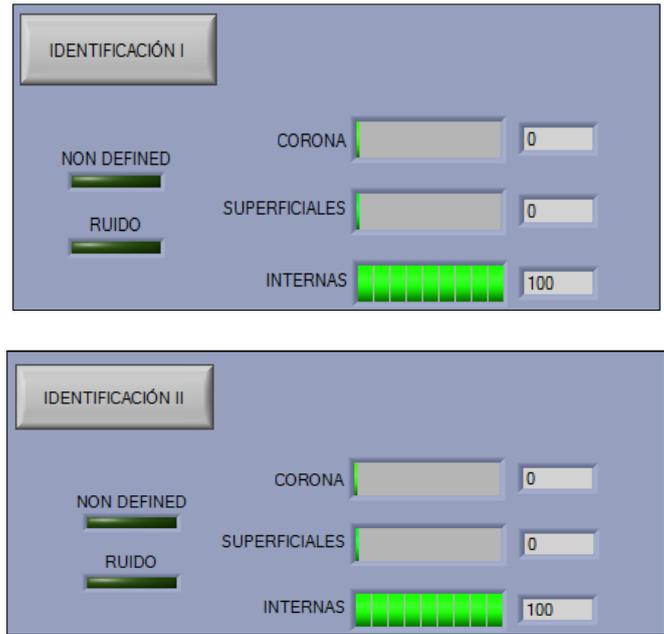
Las adquisiciones *8kV\_1+1+1\_3vacuolas1*, *2vacuolas\_7kV* y *meta\_14kV* son identificadas por ambos sistemas como internas, designándoles, tanto el primer algoritmo como el segundo (véase Figura 5.22, 5.24 y 5.26), una probabilidad del 100%.

En estos casos, viendo que estos PRPDs tienen un ángulo de inyección cercano a la zona del paso por cero de la onda sinusoidal, y que además cuentan con una alta variabilidad en la magnitud de las descargas (valor bajo de  $\beta$ ) en dicha zona, se puede establecer estos PRPDs como los típicos de las descargas parciales internas, y por lo tanto, inferir el éxito de la clasificación realizada.

- Archivo internas 4kV\_1+1+1\_2vacuolas



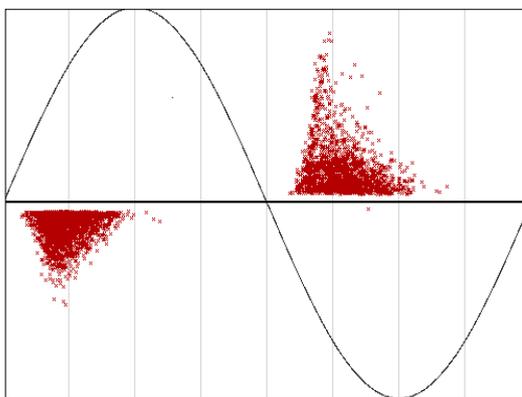
**Figura 5.27. PRPD internas 4kV\_1+1+1\_2vacuolas (izquierda) y tabla de resultados (derecha)**



**Figura 5.28. Resultados internas 4kV\_1+1+1\_2vacuolas: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo)**

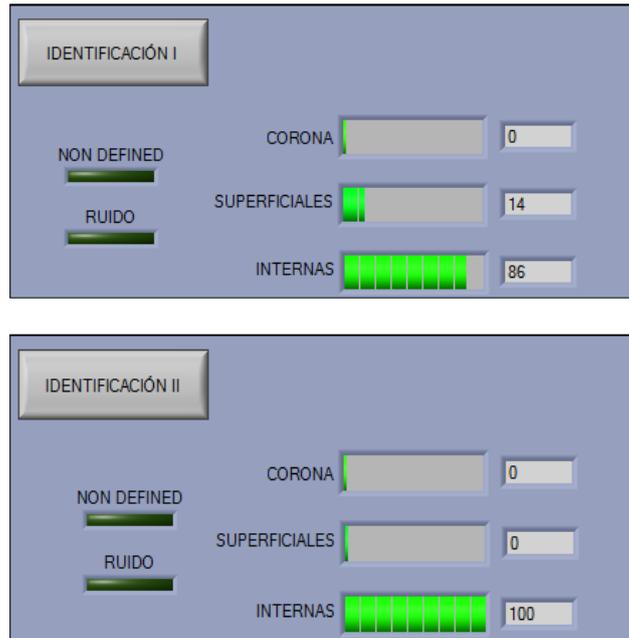
En cuanto a los resultados del archivo *4kV\_1+1+1\_2vacuolas*, ambos sistemas determinan que estos pulsos pertenecen a descargas internas con un 100% de probabilidad. Aunque es cierto que la forma de su PRPD es algo diferente al de los patrones de la base de datos (véase 3.1), en ocasiones para descargas internas se da este tipo de patrón. En cuanto a la clasificación, hay que señalar que ambos sistemas identifican correctamente el archivo.

- Archivo internas 8kV\_1+1+1\_3vacuolas3



	Internas	
	8kV_1+1+1_3vacuolas3	
	Semiciclo Positivo	Semiciclo Negativo
$\beta$	1,74	1,37
$\varphi_i$	12,49	15,72
$\varphi_m$	43,04	50,97
$\varphi_{im}$	23,96	28,09
$\Delta\varphi$	236,67	107,07

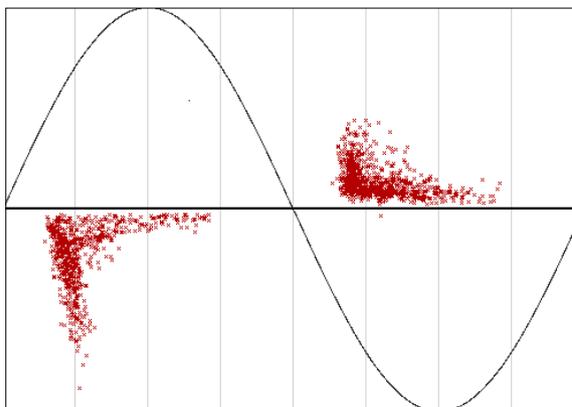
**Figura 5.29. PRPD internas 8kV\_1+1+1\_3vacuolas3 (izquierda) y tabla de resultados (derecha)**



**Figura 5.30. Resultados internas 8kV\_1+1+1\_3vacuolas3: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo)**

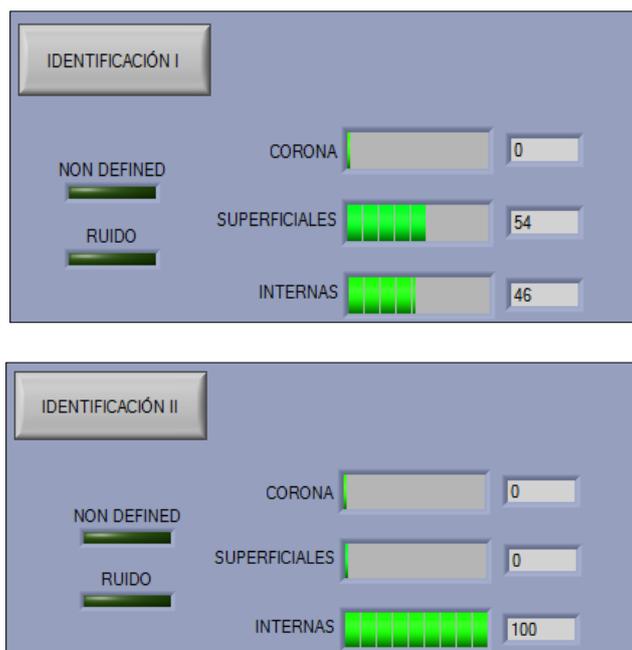
Analizando los resultados del archivo *8kV\_1+1+1\_3vacuolas3*, el primer algoritmo determina que la tipología de descargas parciales corresponde con internas, otorgando un grado de pertenencia a esta clase del 86% (véase Figura 5.30). El segundo algoritmo constata que el PRPD es del tipo internas, con una fiabilidad prácticamente igual al 100%. De esta forma, en esta adquisición, el segundo algoritmo aporta fiabilidad y resuelve la pequeña incertidumbre mostrada por el primero.

- Archivo internas metacrilato\_12kV



Internas metacrilato_12kV		
	Semiciclo Positivo	Semiciclo Negativo
$\beta$	1,4	1,86
$\varphi_i$	26,29	24,14
$\varphi_m$	49,92	51,59
$\varphi_{im}$	39,2	36,62
$\Delta\varphi$	207,57	103,81

**Figura 5.31. PRPD internas metacrilato\_12kV (izquierda) y tabla de resultados (derecha)**



**Figura 5.32. Resultados internas metacrilato\_12kV: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo)**

Los resultados del archivo *metacrilato\_12kV* no son tan clarificadores como en los casos anteriores. Por un lado, tal y como se puede ver en la Figura 5.32, el primer sistema identifica estos pulsos como superficiales, con una probabilidad del 54%. Sin embargo, debido al bajo valor de  $\phi_{im}$ , el segundo algoritmo determina que la fuente de estas descargas parciales corresponde a internas al 100%. Cabe destacar el hecho de que, al igual que en el caso del fichero *8kV\_1+1+1\_3vacuolas3*, el patrón resuelto en fase es ciertamente asimétrico para ambas polaridades, lo que puede dificultar el reconocimiento.

Aunque para llegar a una conclusión fiable habría que componer un estudio con otros parámetros como la *skewness* o el ángulo de extinción medio, a partir del patrón PRPD de la Figura 5.31 se puede identificar una particularidad de las descargas parciales internas: La alta variabilidad de los pulsos en la zona cercana al ángulo de inyección.

## 5.2. ANÁLISIS DEL SISTEMA DE IDENTIFICACIÓN

### 5.2.1. Conclusiones del sistema de identificación

A partir de los resultados obtenidos en el apartado anterior, lo primero que se debe destacar es que en los archivos *lámina\_1-8kV\_elecgrande*, *lámina\_1-8kV*, *2vacuolas\_7kV*, *meta\_14kV* y *8kV\_1+1+1\_3vacuolas1*, ambos sistemas realizan una correcta clasificación, coincidiendo en la resolución de la tipología de descargas parciales. El motivo de que esto ocurra es que los PRPDs de estos ensayos son propios de sus respectivas fuentes de emisión de descargas parciales.

Por otro lado, en los ensayos *nomex1200* y *8kV\_1+1+1\_3vacuolas3*, los resultados de los dos modos de identificación son complementarios. En estos casos, uno de los algoritmos otorga una cierta probabilidad a una fuente de emisión de descargas parciales (mayor del 50%) y el otro concede el 100% a esta misma clase de descargas parciales, reafirmando y resolviendo la incertidumbre de la solución mostrada por la primera clasificación.

En el caso de los archivos *metacrilato\_12kV*, *par* y *nomex1600*, los dos sistemas emiten un veredicto contradictorio, del que no se puede sacar ninguna conclusión fiable. Esto es debido al hecho de que los PRPDs de estas pruebas no son tan claros como lo eran los anteriores, ya que especialmente en el caso de las descargas superficiales e internas, a causa de la similitud de algunos PRPDs, la dificultad a la hora de diferenciarlos es muy elevada.

Del análisis de los archivos corona ocurre lo siguiente: El primer algoritmo es capaz de identificar únicamente los archivos *tr 7kV* y *trin 5kV*; por el contrario, el segundo sólo reconoce las adquisiciones *2700v1* y *2700v5*. Aunque como ya se ha comentado, el PRPD del ensayo *cor* es muy singular, el resto de PRPDs sí que corresponden con patrones típicos de descargas corona. De aquí se advierte un posible problema en los valores umbrales de  $\varphi_m$  y  $\varphi_{im}$  establecidos para el reconocimiento de descargas corona.

Como solución a los problemas que se acaban de mencionar, en primer lugar convendría aumentar la base de datos utilizada para caracterizar cada tipo de descarga parcial, con el objetivo de contemplar el mayor número de casos y poder determinar si se desecha algún PRPD que se considere anómalo.

Una vez perfeccionada la definición de cada fuente de descarga parcial, habría que redefinir de nuevo los valores umbrales de cada parámetro estadístico. En algunos casos habrá que ampliar los intervalos de confianza de los marcadores, teniendo que utilizar un tratamiento probabilístico para posibles nuevos solapamientos.

### 5.2.2. Ampliación base de datos para caracterización de descargas corona

Con el objeto de intentar resolver los problemas mencionados anteriormente en la identificación de descargas corona, en este apartado se va a proceder a ampliar la base de datos definida en el *Capítulo 3* para caracterizar esta tipología de descargas parciales.

De esta forma, las adquisiciones que conforman la base de datos, con sus respectivos resultados, son las siguientes:

- Ensayo corona 1 (punta-plano)

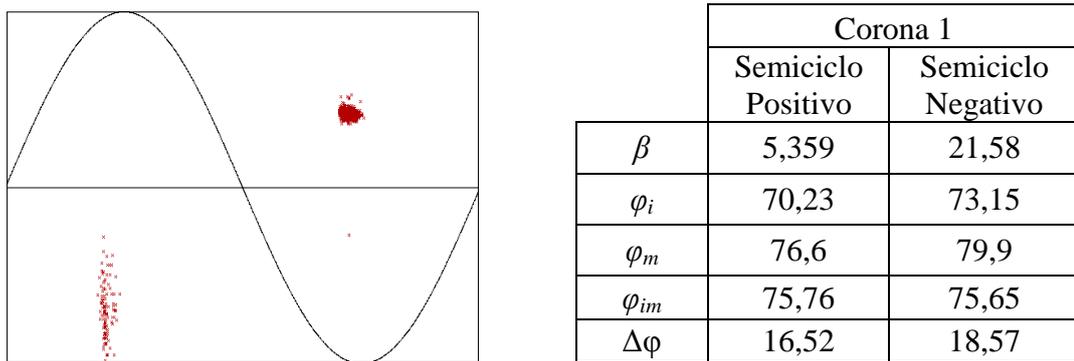


Figura 5.33. PRPD corona 1 (izquierda) y tabla de resultados (derecha)

- Ensayo corona 2 (tridente)

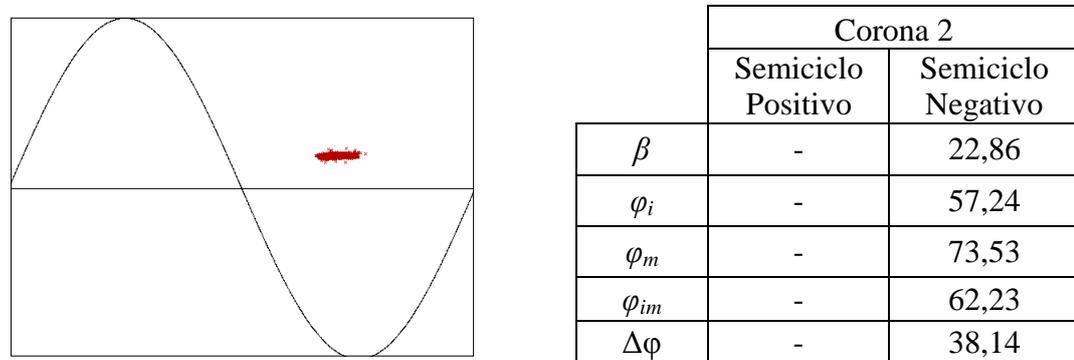
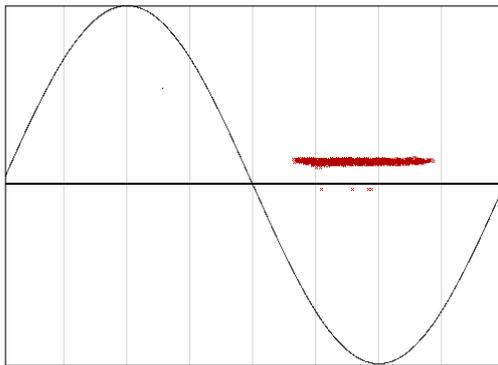


Figura 5.34. PRPD corona 2 (izquierda) y tabla de resultados (derecha)

- Ensayo corona 3 (tr 7kV)



	Corona 3	
	Semiciclo Positivo	Semiciclo Negativo
$\beta$	-	16,18
$\varphi_i$	-	29,2
$\varphi_m$	-	75,4
$\varphi_{im}$	-	32,71
$\Delta\varphi$	-	100,28

Figura 5.35. PRPD corona 3 (izquierda) y tabla de resultados (derecha)

A partir del estudio de estos resultados se observa que, en el caso del primer algoritmo de decisión, esta ampliación no afecta al intervalo de confianza definido en el *Capítulo 3*, que para descargas corona se estableció entre  $70^\circ < \varphi_m < 85^\circ$ . Esto indica que este algoritmo se mantiene tal y como se diseñó (véase 3.3.2).

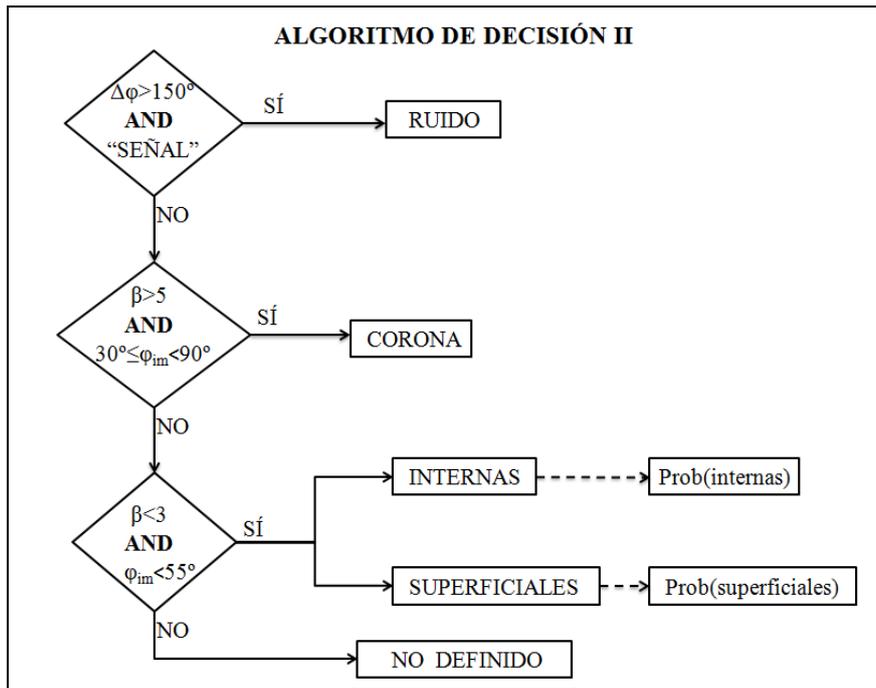
Sin embargo, la adición del ensayo *Corona 3* sí influye en los valores umbrales definidos previamente para el segundo sistema de clasificación (véase 3.3.3). Finalmente, una vez modificados, los intervalos de confianza de cada clase de descargas parciales del segundo algoritmo quedan de la siguiente manera:

VALORES UMBRALES IV	
	$\varphi_{im} (^\circ)$
SUPERFICIALES	$43 \leq \varphi_{im} < 55$
INTERNAS	$-5 \leq \varphi_{im} < 46$
CORONA	$30 \leq \varphi_{im} < 90$

Tabla 5.1. Valores umbrales IV

Como se puede apreciar en la tabla anterior, existe un solapamiento del marcador  $\varphi_{im}$  entre corona y superficiales e internas. En este caso, debido a que el parámetro  $\beta$  para descargas corona es mucho mayor que para internas y superficiales, a dicho solapamiento no se le aplicará un tratamiento probabilístico.

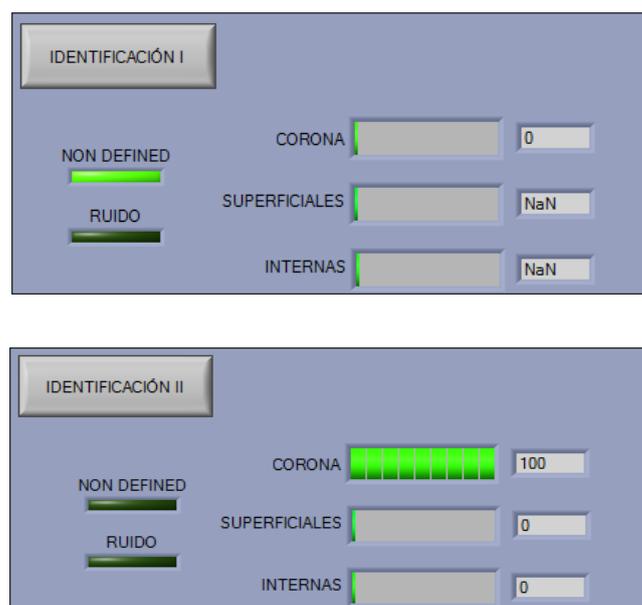
En la siguiente figura se muestra el árbol de decisión para el segundo sistema de decisión:



**Figura 5.36. Árbol de decisión II**

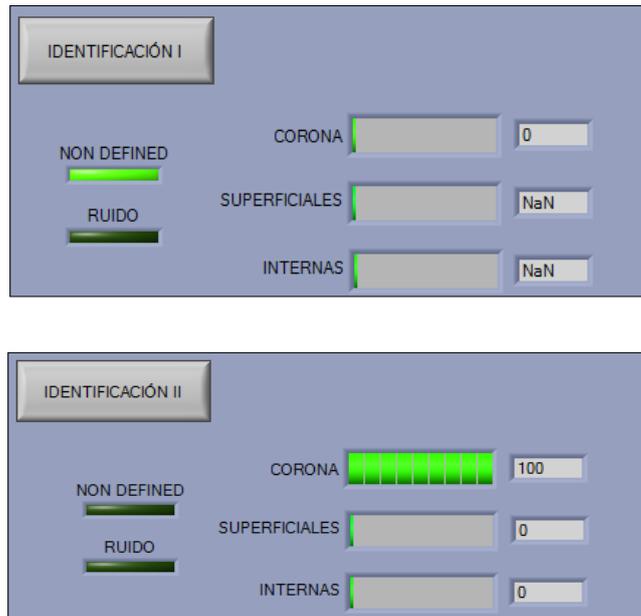
En cuanto a la identificación de descargas superficiales e internas, el cálculo de la probabilidad queda exactamente igual a cómo se estableció en el *Capítulo 3* (véase 3.3.3). A modo de comprobación, a continuación se volverán a procesar los mismos archivos de la carpeta corona (véase 5.1.1). Al haberse presentado anteriormente los patrones PRPDs y la tabla con los resultados de cada prueba, en esta ocasión, únicamente se mostrará la imagen con el resultado de la clasificación mostrada por el *software LINEALT\_PROCESSING* para cada sistema de identificación:

- Archivo corona 2700v1



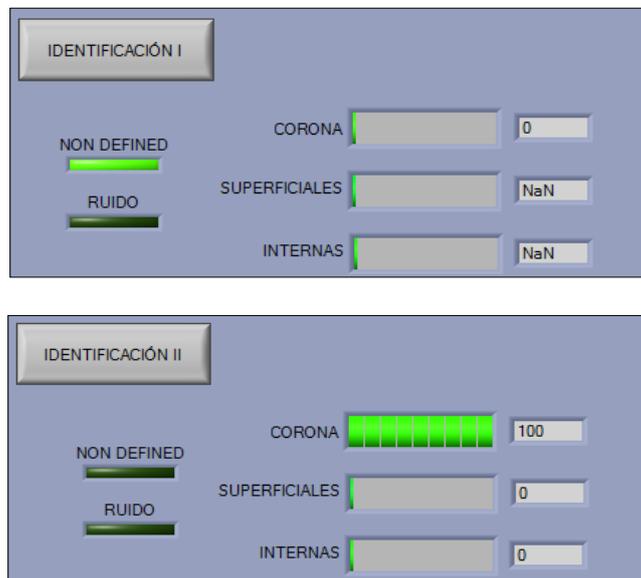
**Figura 5.37. Comprobación corona 2700v1: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo)**

- Archivo corona 2700v5



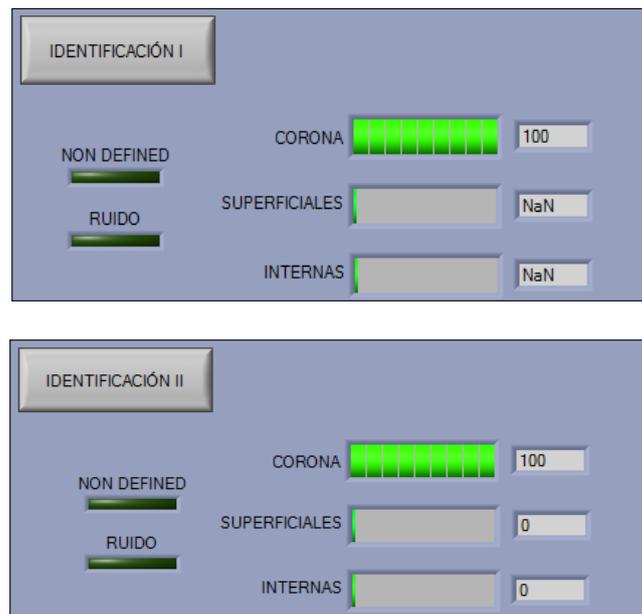
**Figura 5.38. Comprobación corona 2700v5: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo)**

- Archivo corona cor



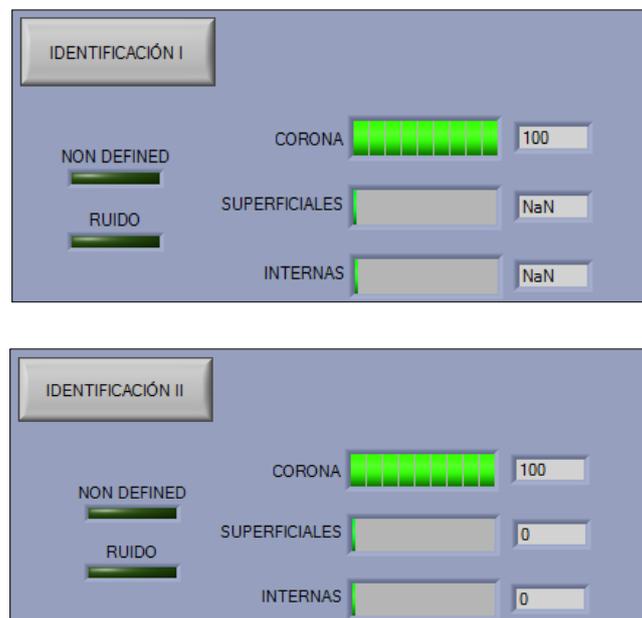
**Figura 5.39. Comprobación corona cor: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo)**

- Archivo corona tr 7kV



**Figura 5.40. Comprobación corona tr 7kV: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo)**

- Archivo corona trin 5kV



**Figura 5.41. Comprobación corona trin 5kV: Identificación I (arriba) e Identificación II (abajo)**

Con esta ampliación de la base de datos, se ha conseguido que ambos sistemas de clasificación reconozcan de manera exitosa los archivos *tr 7kV* y *trin 5kV* (véase Figura 5.40 y 5.41). Además, tal y como se puede ver en la Figura 5.39, el segundo algoritmo de decisión determina que el patrón PRPD del ensayo *cor* pertenece a descargas corona. Por el contrario, en el caso de las adquisiciones *2700v1* y *2700v5*, no

se ha producido ningún cambio en la identificación, únicamente el segundo método reconoce cómo descargas corona estos ficheros.

Se puede concluir que, con esta ampliación, se ha logrado una mejoría considerable en la identificación de descargas corona, ya que se ha aclarado por completo la fuente de los pulsos para los archivos *tr 7kV* y *trin 5kV*, y para la adquisición *cor*, a pesar de lo peculiar de su patrón PRPD, se ha conseguido que al menos uno de los algoritmos apunte que estas descargas pertenecen a corona.

## Conclusiones y trabajos futuros

### 6.1. CONCLUSIONES

Con el desarrollo de este trabajo, se ha logrado implementar un *software* capaz de caracterizar el fenómeno de las descargas parciales (PDs). Además, con gran éxito se ha conseguido proveer al programa de una herramienta optimizada de filtrado manual con la que poder eliminar un determinado *cluster* de pulsos de la representación magnitud-fase de descargas parciales, con la actualización instantánea de los parámetros estadísticos tras realizar el filtrado. Este método de filtrado resulta un gran complemento a la técnica de separación de fuentes de descargas parciales y ruido basada en el análisis de potencia espectral PRL (*Power Ratio for Low Frequencies*) y PRH (*Power Ratio for High Frequencies*) con la que ya cuenta *LINEALT\_PROCESSING* [34].

Gracias a los marcadores y gráficos estadísticos proporcionados, el *software* ofrece un sistema de procesamiento estadístico muy completo y fiable (los parámetros, tanto de amplitud como de fase, se contrastaron en el *Capítulo 3* con el programa comercializado *PD\_PROCESSING*). A partir de la interpretación de estos parámetros estadísticos, un usuario podría ser capaz de concluir la clase de descargas parciales que está analizando y cuantificar la actividad de descargas parciales en términos de magnitud y/o fase.

Por último, se ha logrado desarrollar un innovador sistema de identificación automática de fuentes de descargas parciales, con la capacidad de diferenciar entre las tres tipologías más comunes de descargas parciales (corona, superficiales e internas) y

ruido. Este primer nivel de clasificación muestra, además de la clase de descargas parciales, la probabilidad de pertenencia a dicha fuente.

Este sistema de identificación está compuesto de dos algoritmos probabilísticos: El primero de ellos ha sido reproducido a partir de la bibliografía citada, utilizando aquellos marcadores estadísticos cuyo comportamiento se presentaba más estable; el segundo algoritmo resulta la aportación más novedosa de este trabajo, basado en el marcador ángulo de inyección medio, un parámetro completamente nuevo y que no había sido estudiado hasta la fecha.

En cuanto a este último parámetro, a la espera de futuros estudios más exhaustivos, los resultados obtenidos en el *Capítulo 3* son prometedores. La idea de ser capaces de caracterizar los tres tipos de descargas parciales con un únicamente este parámetro y  $\beta$ , además de facilitar la clasificación de descargas parciales, abre un gran abanico de posibilidades a la hora de futuros análisis de caracterización de patrones resueltos en fase (PRPDs).

A la vista de los resultados obtenidos en el *Capítulo 5*, queda demostrada la gran eficacia del sistema de clasificación cuando los PRPDs son los característicos de cada tipología de descarga parcial. Sin embargo, cuando los PRPDs no son tan puros, en ocasiones este método de identificación ofrece resultados variados, sobre todo cuando se trata de descargas del tipo corona.

En la actualidad, este módulo se haya integrado en el *software off-line LINEALT\_PROCESSING*, un programa de procesamiento de patrones resueltos en fase cuyo cometido es ayudar en el diagnóstico de sistemas de aislamiento. Este programa, junto al módulo desarrollado en este trabajo, constituye una importante herramienta para el Laboratorio de Investigación y Ensayos en Alta Tensión (LINEALT) de la Universidad Carlos III de Madrid.

## **6.2. TRABAJOS FUTUROS**

A partir del desarrollo de este primer sistema de identificación y viendo los resultados obtenidos con el parámetro ángulo de inyección medio, aparecen nuevas posibilidades para la caracterización de las descargas parciales. Por ello, sería conveniente seguir trabajando en:

- Ampliación de la base de datos utilizada para definir con mayor precisión los valores umbrales de cada marcador y caracterizar mejor cada tipología de descarga parcial.
- Estudio en profundidad del comportamiento de los parámetros ángulo de inyección medio y ángulo de extinción medio.

- Desarrollo de un sistema de identificación de fuentes de descargas parciales con algoritmos basados en lógica *fuzzy* (lógica difusa), redes neuronales o máquinas de vectores soporte (“Support Vector Machine”).
- Habilitar el filtrado por fase y *trigger* en el *software* de adquisición y procesamiento *on-line PD\_LINEALT*.
- Desarrollo de un sistema de filtrado automático por fase y *trigger* basado en el análisis de la evolución de la densidad de descargas parciales a lo largo del ciclo de onda sinusoidal.
- Visualización de los PRPDs en tres dimensiones. Actualmente se tienen dos dimensiones (amplitud y fase), por lo que la tercera dimensión (ya sea con un tercer eje o bien con un código de colores) daría información adicional acerca del número de descargas en dicha fase.
- Implantar un sistema de clasificación de segundo nivel en el que, para cada tipo de activo (maquinas y/o cables), se pueda identificar diferentes tipos de descargas parciales [35]. Para ello, otros parámetros como *Kurtosis*, *Skewness*, *cross-correlation*, etc. serán necesarios.

## Planificación

En este apartado se va a mostrar la planificación de las tareas que se ha seguido en el desarrollo de este proyecto. Se procederá a describir, no sólo las distintas labores en las que se ha dividido el trabajo, sino también el orden de ejecución de éstas y el tiempo dedicado a cada una de ellas.

Para llevar a cabo esta planificación se ha utilizado el *software Microsoft Project*. El uso de esta herramienta está indicado para la gestión y administración de proyectos, siendo especialmente útil su utilización en el diseño de planes de proyectos.

### 7.1. TAREAS

A continuación se detallan las tareas en las que se ha decidido desglosar el trabajo:

- Aprendizaje programación *LabVIEW*: Estudio del lenguaje de programación.
- PROGRAMACIÓN *SOFTWARE*:
  - Programación del filtrado: Filtrado por fase y amplitud.
  - Programación parámetros estadísticos: Programación de los parámetros  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $Q_{\text{máx}}$ ,  $Q_{\text{máx}95\%}$ ,  $r^2$ ,  $N_w$ ,  $\Delta\varphi$ ,  $\varphi_i$ ,  $\varphi_m$ , *Skewness*,  $\varphi_{im}$  y  $\varphi_{em}$ .
  - Programación gráficos estadísticos: Programación de la distribución de amplitud  $H(q)$  y la gráfica acumulada de probabilidad de Weibull.
  - Optimizado del programa: Modificación del programa para que su funcionamiento posea una mayor eficiencia.
  - Comprobación del funcionamiento del *software*: Verificación del programa.
  - Programación del sistema de identificación automático: Programación de los dos algoritmos probabilísticos.

- REALIZACIÓN DE ENSAYOS: Ensayos para la caracterización de las tres fuentes de descargas parciales (corona, superficiales e internas) y ruido.
- REDACCIÓN MEMORIA DEL PROYECTO:
  - Redacción Capítulo 1.
  - Redacción Capítulo 2.
  - Redacción Capítulo 3.
  - Redacción Capítulo 4.
  - Redacción Capítulo 5.
  - Redacción Capítulo 6.
  - Elaboración Presupuesto.
- EDICIÓN Y REVISIÓN DEL PROYECTO.

## 7.2. PLANIFICACIÓN TAREAS

La Figura 7.1, obtenida a partir de *Microsoft Project*, da información acerca de la fecha de comienzo y final de cada tarea, su duración y la correspondiente jerarquía de ejecución de éstas.

	Task Name	Duration	Start	Finish	Predecessors
1	<b>INICIO</b>	0 days	Thu 30/01/14	Thu 30/01/14	
2	APRENDIZAJE PROGRAMACIÓN LABVIEW	15 days	Thu 30/01/14	Wed 19/02/14	1
3	▢ <b>PROGRAMACIÓN SOFTWARE</b>	<b>124 days</b>	<b>Thu 20/02/14</b>	<b>Tue 12/08/14</b>	<b>2</b>
4	Programación filtrado	50 days	Thu 20/02/14	Wed 30/04/14	2
5	Programación parámetros estadísticos	40 days	Mon 03/03/14	Fri 25/04/14	
6	Programación gráficos estadísticos	15 days	Mon 28/04/14	Fri 16/05/14	5
7	Optimizado del programa	10 days	Mon 19/05/14	Fri 30/05/14	4;5;6
8	Comprobación software	15 days	Mon 02/06/14	Fri 20/06/14	7
9	Programación sistema de identificación automático	15 days	Wed 23/07/14	Tue 12/08/14	14;8
10	REALIZACIÓN ENSAYOS	2 days	Mon 23/06/14	Tue 24/06/14	8
11	▢ <b>REDACCIÓN PROYECTO</b>	<b>159 days</b>	<b>Thu 30/01/14</b>	<b>Tue 09/09/14</b>	
12	Redacción capítulo 1	5 days	Thu 30/01/14	Wed 05/02/14	
13	Redacción capítulo 2	90 days	Thu 06/02/14	Wed 11/06/14	12
14	Redacción capítulo 3	20 days	Wed 25/06/14	Tue 22/07/14	10
15	Redacción capítulo 4	15 days	Wed 13/08/14	Tue 02/09/14	3
16	Redacción capítulo 5	15 days	Wed 13/08/14	Tue 02/09/14	9
17	Redacción capítulo 6	4 days	Wed 03/09/14	Mon 08/09/14	16
18	Presupuesto	1 day	Tue 09/09/14	Tue 09/09/14	17
19	EDICIÓN Y REVISIÓN PROYECTO	5 days	Wed 10/09/14	Tue 16/09/14	18
20	<b>FIN PROYECTO</b>	0 days	Wed 17/09/14	Wed 17/09/14	19

Figura 7.1. Información Tareas

A continuación se presenta el Diagrama de Gantt, en el cual se puede ver la planificación mostrada en la anterior figura de manera gráfica:

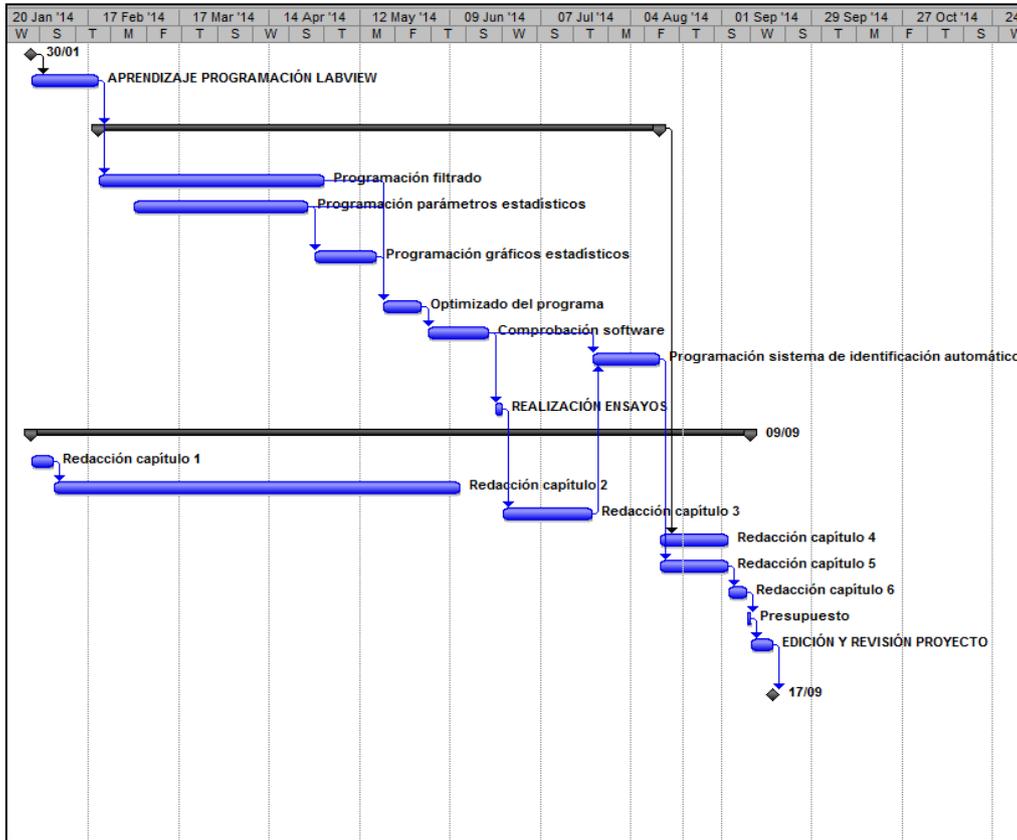


Figura 7.2. Diagrama de Gantt

# Capítulo 8

## Presupuesto

El presente presupuesto hace referencia a un proyecto de investigación, en el que se debe contemplar todos los costes derivados de diseño del programa informático y los costes asociados al desarrollo de los diferentes ensayos realizados en el Laboratorio de Investigación y Ensayos en Alta Tensión de la Universidad Carlos III de Madrid.

Aunque a primera vista el resultado del presupuesto puede resultar excesivo, hay que tener en cuenta que la ejecución de este *software* no se ha realizado con vistas a una posible comercialización que diera lugar a su amortización y rentabilización. Este proyecto se realiza exclusivamente bajo pedido de un cliente, en este caso el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Carlos III de Madrid, el cual establece las especificaciones, características, prestaciones y plazo de entrega.

El presupuesto se divide en costes directos (personal e instalaciones, costes de elementos *software* y *hardware*), a continuación se desglosa cada uno de estos conceptos:

### 8.1. COSTES DIRECTOS

#### 8.1.1. Costes de personal e instalaciones

En el coste de personal, se van a tener en cuenta todas las personas involucradas en el proyecto. En la siguiente tabla se recogen los costes de personal:

Nombre	Categoría	Euros/hora	Horas	Coste total (€)
Álvaro Perea Perelló	Ingeniero Junior	15	700	10.500
Jorge Alfredo Ardila Rey	Ingeniero Senior	35	40	1.400
Juan Manuel Martínez Tarifa	Ingeniero Senior	35	20	700
<b>TOTAL:</b>				<b>12.600</b>

Tabla 8.1. Costes de personal

En cuanto al coste de instalaciones, se ha supuesto el alquiler del Laboratorio de Investigación y Ensayos en Alta Tensión de la Universidad Carlos III de Madrid para la realización de los ensayos descritos en el *Capítulo 3*. Al llevarse a cabo estas pruebas en varios días distintos, se ha estimado un tiempo total de uso del laboratorio de 12 horas. El precio de 50€/hora de alquiler es orientativo.

Instalación	Alquiler	Euros/hora	Horas totales	Coste total (€)
Laboratorio de Investigación y Ensayos en Alta Tensión de la Universidad Carlos III de Madrid	El alquiler incluye la utilización del laboratorio, los objetos de ensayo y los equipos de medida.	50	12	600
<b>TOTAL:</b>				<b>600</b>

Tabla 8.2. Costes de instalaciones

### 8.1.2. Costes elementos *software* y *hardware*

En este apartado se contemplarán todos los costes materiales referidos al diseño del programa. Además, se incluirán todos los equipos necesarios para el desarrollo del proyecto como pueden ser la tarjeta de adquisición de datos con su correspondiente módulo de control. A continuación se detallan estos costes:

Concepto/ Referencia	Descripción	Precio unitario (€)	Cantidad	Coste total (€)
Licencia Labview 2010	Paquete Académico Estándar de Labview 2010 proporcionado por National Instruments. Compatible con cualquier ordenador que posea un sistema operativo Windows, MAC o Linux.	3.000	1	3.000
Módulo de control NI-PXIe-8115	Procesador Intel dual core i5-2510E con 2 GB de memoria RAM.	5.000	1	5.000
Tarjeta adquisición NI-PXIe-1082	Tarjeta de 2 canales de adquisición, con una frecuencia de muestreo de 200MS/s por canal y resolución vertical de 12 bit. Además está incluido el cableado.	15.000	1	15.000
<b>TOTAL:</b>				<b>23.000</b>

Tabla 8.3. Costes de elementos *software* y *hardware*

## 8.2. PRESUPUESTO FINAL

Para el cálculo del presupuesto final, además de agrupar los importes mencionados anteriormente, se añadirán los denominados costes indirectos. Estos costes, en nuestro caso, vienen representados por el Impuesto sobre el Valor Añadido (I.V.A.), para el cual se contemplará un 21%. El presupuesto final queda de la siguiente manera:

Costes de personal e instalaciones.....	13.200€.
Costes elementos <i>software</i> y <i>hardware</i> .....	23.000€.
	_____
Total costes directos.....	36.200€.
	_____
I.V.A. (21%).....	7.602€.
	_____
TOTAL.....	43.802€.

El total del presupuesto asciende a una cantidad de:

Cuarenta y tres mil ochocientos dos euros.

# Bibliografía

---

- [1]. James, R. E.; Su, G.; “Condition assessment of High Voltage Insulation in Power System Equipment”; The Institution of Engineering and Technology, 2008.
- [2]. Díaz Gautier, J.R.; “Caracterización de defectos en sistemas de aislamiento mediante detección de descargas parciales”; Proyecto Fin de Carrera, Universidad Carlos III de Madrid, 2002.
- [3]. Kreuger, F. H.; “Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment”; Butterworths, Londres, 1989.
- [4]. Morshuis, P.; “Partial Discharge Mechanisms”; Tesis Doctoral, Delft University Press, The Netherlands, 1993.
- [5]. Stone, G.; Boutler, E.A.; Culbert, I.; Dhirani. H.; “Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing and Repair”; IEEE Press Series on Power Engineering, Wiley Interscience; 2004.
- [6]. Kuffel, E.; Zaengl, W.S.; and Kuffel, J.; “High Voltage Engineering: Fundamentals”, 2nd ed.; Butterworth-Heinemann; 2000.
- [7]. Khalifa, M.; “High Voltage Engineering (Theory and Practice)”; 1990.
- [8]. Bartnikas, R.; McMahon, E.J.; “Engineering Dielectrics, Volume I. Corona Measurements and Interpretation”; ASTM, Philadelphia, 1979.
- [9]. Pedersen, A.; “On the electrodynamics of partial discharges in voids in solid dielectrics”; Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, 1989. Proceedings of the 3rd International Conference on, pp.107-116, 3-6 Jul 1989.
- [10]. Dissado, L.; Fothergill, J. C.; “Electrical Degradation and Breakdown in Polymers”; London, IEE Materials and Devices Series, pp 319-339, 1992.
- [11]. Ghani, A.B.A.; Zarim, Z.A.A.; Majeed, J.A.; Osman, H.; “Diagnostic criteria based on the correlation of the measurement of DGA, moisture contents with PD &  $\tan \delta$  in MV oil-filled underground cable”; Dielectric Liquids (ICDL), 2011 IEEE International Conference on, pp.1-4, 26-30 June 2011.
- [12]. Torres, H.; “Aislamientos eléctricos”; Universidad Nacional de Colombia, 2011.

- [13]. Schwarz, R.; Muhr, M.; “Modern technologies in optical partial discharge detection”; Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2007. CEIDP 2007. Annual Report - Conference on, pp.163-166, 14-17 Oct. 2007.
- [14]. Markalous, S.; Tenbohlen, S.; Feser, K.; “Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals”; Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, vol.15, pp.1576-1583, December 2008.
- [15]. Mejino, M.; “Caracterización de ruido y descargas parciales mediante análisis cromático de señales en radiofrecuencia”; Trabajo Fin de Grado, Universidad Carlos III de Madrid, 2012.
- [16]. IEC 60270. High Voltage Test Techniques. Partial Discharge Measurements, 3a edition, 2000.
- [17]. Rojas, M.V.; “Sensor de acoplamiento inductivo para la medida de pulsos de corriente de alta frecuencia. Aplicación para la medida y detección de descargas parciales”; Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, 2011.
- [18]. CIGRE; “Recognition of Discharges”; Electra, 1969.
- [19]. Cavallini, A.; Montanari, G.C.; “Effect of supply voltage frequency on testing of insulation system”; Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, vol.13, pp. 111- 121, Feb. 2006.
- [20]. Stone, G.C.; “The statistics of aging models and practical reality”; Electrical Insulation, IEEE Transactions on, vol.28, pp.716-728, Oct 1993.
- [21]. Cacciari, M.; Contin, A.; Rabach, G.; Montanari, G.C.; “An approach to partial-discharge investigation by height-distribution analysis”; Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings, vol.142, pp.102-108, Jan 1995.
- [22]. Contin, A.; Contessotto, G.; Montanari, G.C.; Cacciari, M.; “Comparing different stochastic models for the identification and separation of concurrent partial discharge phenomena”; Dielectric Materials, Measurements and Applications, 2000. Eighth International Conference on (IEE Conf. Publ. No. 473), pp.374-379, 2000.
- [21]. Cacciari, M.; Contin, A.; Montanari, G.C.; “Use of a mixed-Weibull distribution for the identification of PD phenomena”; Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, vol.2, pp.1166-1179, Dec 1995.
- [23]. Krivda, A.; “Recognition of Discharges Discrimination and Classification”; Delft Press; 1995.

- [24]. Cavallini, A.; Conti, M.; Contin, A.; Montanari, G.C.; “Advance PD inference in on-field measurements. Part 2: Identification of defects in solid insulation systems”; Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, vol.10, pp. 528-537, June 2003.
- [25]. Cavallini, A.; Conti, M.; Montanari, G.C.; “Indexes for the recognition of insulation system defects derived from partial discharge measurements”; Electrical Insulation, 2002 Conference Record of the 2002 IEEE Symposium on, pp.511-515, 7-10 April 2002.
- [26]. Cavallini, A.; Montanari, G.; Contin, A.; Pulletti, F.; “A new approach to the diagnosis of solid insulation systems based on PD signal inference”; IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 19, pp. 22–30, Mar-Apr 2003.
- [27]. Ardila-Rey J.A, Martínez-Tarifa J.M, Robles G, Rojas-Moreno M.V; “Partial Discharge and Noise Separation by Means of Spectral-power Clustering Techniques”; Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, Vol. 20, Issue 4, pp: 1436-1443, August 2013.
- [28]. Sahoo, N.; Salama, M.; Bartnikas, R.; “Trends in partial discharge pattern classification: a survey”; Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, Vol. 12(2): 248-264, 2005.
- [29]. Cavallini, A.; Montanari, G.C.; Puletti, F.; Contin, A.; “A new methodology for the identification of PD in electrical apparatus: properties and applications”; Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, vol.12, pp. 203-215, April 2005.
- [30]. Ardila-Rey, J.A.; “Sistema de adquisición de descargas parciales. Caracterización de fuentes de descarga y ruido por análisis de potencia espectral”; Tesis de Máster, Universidad Carlos III de Madrid, 2012.
- [31]. Manuel, A.; del Río, J.; “LabVIEW 7.1. Programación Gráfica para el Control de Instrumentación”; Paraninfo, 2005.
- [32]. Lajara, J.R.; Pelegrí, J.; “LabVIEW. Entorno gráfico de programación”; Marcombo, 2011.
- [33]. National Instruments. Discussion Forums: <http://forums.ni.com/>
- [34]. Ardila-Rey, J.A.; “Separación de fuentes de descargas parciales y ruido eléctrico mediante análisis de potencia espectral en alta frecuencia”; Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, 2014.

[35]. IEC TS 60034-27-2; “Rotating electrical machines - Part 27-2: On-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines”; 2012.